MARTE, UN PLANETA SINGULAR • POR QUE VEMOS LO QUE VEMOS

INVESTIGACION y CIENCIA

AGOSTO 2003
5,50 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

AUTORREPARACION DE ORDENADORES

LA ENFERMEDAD CONSUNTIVA CRONICA

MAS ALLA DEL MODELO ESTANDAR DE LA FISICA

CONTAMINACION DE ACUIFEROS POR GASOLINA

EL CALAFATEO DE LOS BUQUES





Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

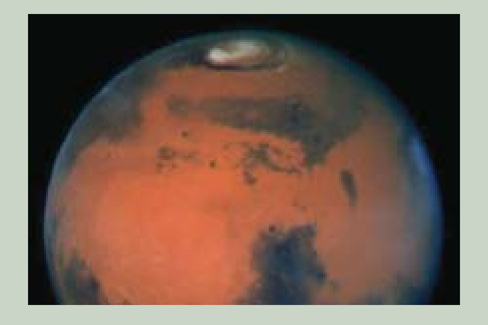
Agosto de 2003

Número 323

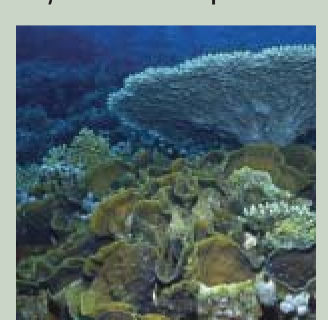
3
HACE...
50, 100 y 150 años.

4
APUNTES
Ornitología... Física...Biología... Fisiología...Ecología... Entomología.

30
CIENCIA Y SOCIEDAD
¿Vida en Marte?... Fauna española, nematódos dulceacuícolas... Nanoelectrónica, medición de la conductividad de una sola molécula... Sismología histórica, terremotos en los Andes venezolanos.



38
DE CERCA
La paradoja de los arrecifes de coral y las selvas tropicales.



40 **Autorreparación de ordenadores**
Armando Fox y David Patterson

Es inevitable que los ordenadores fallen. Una informática fiable exige que se construyan sistemas que sólo sufran caídas poco violentas y se recuperen con rapidez.

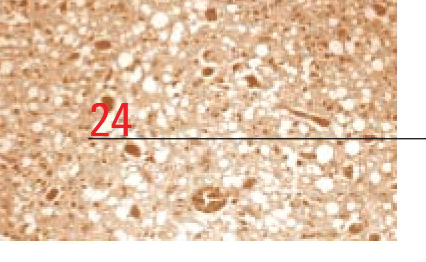
6
Contaminación de acuíferos por gasolina
Mónica Rosell, Silvia Lacorte y Damià Barceló

Los aditivos oxigenados de la gasolina sustituyeron a los derivados del plomo. ¿En que medida uno de ellos, el metil tert-butil eter, afecta a la calidad de las aguas?

14
Marte, un planeta singular
Arden L. Albee

La actuación conjunta de agua, hielo y viento ha esculpido el paisaje del planeta rojo, a lo largo de miles de millones de años. Aunque los procesos que intervinieron en su conformación comparten características con los que operan en la superficie de la Tierra, divergen en rasgos sustanciales.





24

La enfermedad consuntiva crónica

Philip Yam

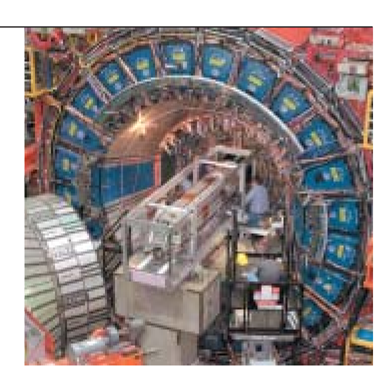
Emparentada con la enfermedad de las vacas locas, la enfermedad consuntiva crónica se está extendiendo entre los ciervos salvajes de los Estados Unidos. Si no se la contiene, este flagelo, de pronóstico letal, podría amenazar el ganado e incluso transmitirse al hombre.

48

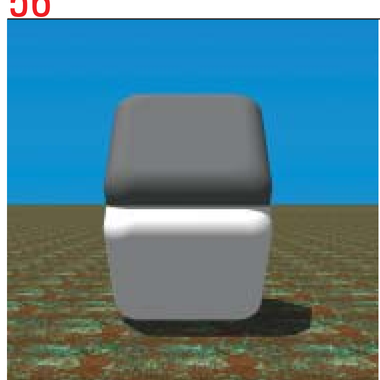
Más allá del modelo estándar de la física

Gordon Kane

Después de 30 años de triunfos, el modelo estándar de la física de partículas está en la cumbre de su éxito. Algo aún mejor viene en camino.



56



Por qué vemos lo que vemos

Dale Purves, R. Beau Lotto y Surajit Nundy

Una estrategia probabilística, basada en la experiencia previa, explica la notable diferencia entre lo que vemos y la realidad física.

66

Cartas encadenadas e historiales de evolución

Charles H. Bennett, Ming Li y Bin Ma

El análisis de las cartas encadenadas enseña a inferir el árbol genealógico de cuanto evolucione, sean genes, lenguas o tareas estudiantiles copiadas.

74

El calafateo de los buques

Jacques Connan



Desde hace 7000 años, los navegantes vienen protegiendo el casco de las embarcaciones. El análisis descubre las mismas técnicas e idénticas sustancias en regiones muy distantes. Se aprecian indicios del uso de la pez tanto en las naves del Mediterráneo como en las del Atlántico.

84
CURIOSIDADES DE LA FÍSICA
Conducir sin manos,
por Wolfgang Bürger



86
JUEGOS MATEMÁTICOS
Un mundo sin números,
por Juan M.R. Parrondo

88
IDEAS APLICADAS
Implantes cocleares,
por Mark Fischetti



90
LIBROS
Galeno,
doctrina sesquimilenaria...
Expedición a Saturno...
Física musical.



96
AVENTURAS PROBLEMÁTICAS
Cuadrados primos,
por Dennis E. Shasha



EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Adrados: *Marte, un planeta singular*; Joandomènec Ros: *La enfermedad consuntiva crónica*; Ramón Pascual: *Más allá del modelo estándar de la física*; Luis Bou: *Por qué vemos lo que vemos, Cartas encadenadas e historiales de evolución* y *Aventuras problemáticas*; Laureano Carbonell: *El calafateo de los buques*; J. Vilardell: *Hace..., Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Slim Films

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

ANTICONCEPCIÓN. «Las investigaciones acerca de la anticoncepción por medios fisiológicos en vez de mecánicos progresan considerablemente, según un reciente informe de Paul Henshaw, de la Fundación para la Paternidad Responsable, que publica *Science*. Tienen un doble objetivo: mejorar la fertilidad de las parejas sin hijos y desarrollar una forma de anticoncepción fiable y cómoda mediante píldoras, inyecciones, cronometría o una combinación de estos métodos.»

UN SUELO MEJOR... QUIZÁ. «Hay quienes acogen los nuevos acondicionadores de tierras cual sustancias milagrosas que, rociadas sobre los suelos, tornasen la arcilla o la arena en mantillos ricos y esponjosos en cuestión de horas, eliminando toda necesidad de materias orgánicas y el deslomador trabajo de cavar y cultivar. Químicamente son polímeros de cadena larga. Funcionalmente, sus cargas moleculares atraen las partículas de arcilla, formando un sinnúmero de terrones o agregados. La Estación Experimental Agrícola de Connecticut realizó algunos experimentos y descubrió que si esas sustancias se emplean en cantidades excesivas, retardan la germinación y reprimen el crecimiento de la planta. Como no son sino plásticos, los acondicionadores plastifican, entiéndase al pie de la letra, la tierra. No obstante, algunos ensayos han incrementado su rendimiento.»

...cien años

E.T. NO ESTÁ AL TELÉFONO. «En Marte, cuando el planeta se coloca en una posición favorable para ser observado, ven los astrónomos una o más proyecciones luminosas irregulares sobre la línea de la salida o de la puesta de sol. La naturaleza de esas proyecciones la conocen los astrónomos muy bien, pero los informes bianuales de esas observaciones suscitan entre el público la pregunta de si no pudieran ser signos de la existencia de seres inteligentes en el planeta. Pueden explicarse satisfactoriamente los fenómenos observados con la teoría de que las proyecciones se deben a nubes de tamaño considerable, a gran altura en la atmósfera rarificada. Los rayos solares iluminarían esas nubes mientras las zonas de tierra situadas debajo de ellas permanecen tan oscuras, que dan un fondo negro. —W. W. Campbell, Observatorio Lick, director.»

NUEVA QUÍMICA. «Lo que deba hacerse con las recién descubiertas sustancias radiactivas es un tema que sume en la perplejidad a los físicos. Se niegan a encajar en nuestro armonioso y bien establecido sistema químico; amenazan incluso con socavar la venerable teoría atómica, que hemos aceptado sin discusión durante casi un siglo. Osamos ahora declarar a los elementos, antes concebidos como formas simples de materia primordial, diminutos sistemas astronómicos de unidades de materia en rotación. Parece más un efluvio etílico que un pensamiento sensato; y sin embargo las nuevas doctrinas son aceptadas por sir Oliver Lodge y el mismo Lord Kelvin.»

LUZ ELÉCTRICA. «Nuestra ilustración muestra un reflector construido por Schuckert & Cía., empresa de Nuremberg (Alemania), con un obturador Iris, a medio cerrar, que tiene un diámetro de 2 metros y lanza un haz de una potencia de 316 millones de bujías. El destino de los reflectores de este tipo es sustituir a las viejas luces de petróleo que durante tanto tiempo lanzaron sus destellos desde los faros para advertir del peligro a los marineros.»



316 millones de bujías eléctricas para los faros, 1903

...ciento cincuenta años

AERÓSTERO METEOROLÓGICO. «El señor John Wise, afamado navegante en globo, con casi doscientos viajes por la atmósfera, nos escribe: "En su artículo sobre los Truenos y Rayos dicen 'haber llegado a la conclusión de que por cada descarga vertical de un rayo que llega a la tierra, hay cincuenta horizontales, que se disipan en la atmósfera, como las ramas de una enredadera dispersándose desde el tronco principal'. Creo que su conclusión es correcta; la disipación tiene lugar en la superficie inferior de la nube. Yo he presenciado lo mismo al navegar por encima de la capa de nubes durante las tormentas".»

PESTE AQUÍ. «Este verano, la ciudad de Nueva York está gravemente afectada por la fiebre amarilla. En un día hubo más de 200 defunciones.»

PESTE ALLÁ. «El cólera está haciendo terribles estragos en algunos lugares de Dinamarca. En Copenhague produjo 300 muertes en un día.»

ORNITOLOGIA

Las aves de colores se extinguen antes

Tener más colores puede que ayude a los pájaros macho a la hora de cortejar, pero también atrae a los depredadores. ¿A qué resultados se ha llegado tras el análisis de los datos del Estudio Norteamericano de Aves Reproductoras, compilados durante 21 años por miles de voluntarios de todo el continente, que contaron los pájaros vistos u oídos durante las mañanas de las temporadas de apareamiento? Por término medio, las especies de aves bicolores desaparecen con una frecuencia casi un 25 por ciento mayor que sus parientes monocromáticos. De ordinario, los pájaros de dos tonos no sufren una extinción total, pues en cuanto una especie desaparece de un entorno, otra, también de colores, la reemplaza. Se confirma así la teoría según la cual las especies a las que la selección sexual somete a fuerte presión afrontan mayores riesgos de extinguirse localmente e indica que las actividades humanas que obstaculizan las migraciones podrían poner en peligro la supervivencia de las especies dicromáticas.

—Charles Choi



El escribano de siete colores (Paserina ciris ciris) *y otras aves polícromas se extinguen localmente antes que sus congéneres pardos*

FISICA

Decepción en el Fermilab

En el artículo que publicamos este mismo mes acerca de la extensión del modelo estándar de partículas elementales, el autor expresa las grandes esperanzas que había puestas en que el Tevatrón, el no hace mucho potenciado acelerador de partículas del Laboratorio Nacional Fermi, descubriese en los próximos años la partícula de Higgs, pieza maestra del modelo estándar aún no observada. Pero no han venido desde allí buenas noticias. El número de colisiones presentadas a los detectores por el acelerador remozado se queda demasiado corto con respecto al esperado. Calculan ahora que el número de colisiones vistas para 2008 será sólo un 20 % o 30 % del pronosticado antes. Como la detección del bosón de Higgs depende de contar con un número suficientemente grande de colisiones, las esperanzas de encontrarlo con esa instalación, en concreto con los experimentos CDF y D0, menguan mucho. En una carta dirigida al personal del Fermilab y fechada el 3 de julio, el director, Mike Witherell, desmentía los rumores de que se fuesen a suspender las tareas programadas —la llamada Segunda Tanda—, aseguraba que en absoluto se presagiaba su fracaso final y presentaba una reorganización de la División de Haces de Partículas encaminada a mejorar con el tiempo el número de colisiones. A veces, la retórica da una idea de cómo van realmente las cosas; la de Witherell reza como sigue: “No sé qué le deparará la naturaleza a la Segunda Tanda, o qué descubrirá; sólo sé que el Fermilab hará de ella un éxito científico. No cabe duda de que nos enfrentamos a dificultades, pero las encararemos juntos, con el talento, la energía y la dedicación extraordinarios que hacen del Fermilab un gran laboratorio. La Segunda Tanda conseguirá grandes logros científicos.”

BIOLOGIA

Visión subacuática

Los moken, pueblo de las costas de Myanmar y Tailandia, practican la pesca subacuática de moluscos, holoturias y otros alimentos marinos. Bajo el agua, la visión se vuelve borrosa. Anna Gislén y sus colaboradores, de la Universidad de Lund, han descubierto una adaptación poco corriente: al contrario que los niños europeos, los moken enfocan bajo el agua los objetos. Reducen el tamaño de las pupilas, reflejo ligado al enfoque y quizás una reacción fisiológica a la inmersión. Un ojo con una pupila menor produce imágenes más nítidas. Gracias a esta adaptación, ven bajo el agua dos veces mejor que los de secano. Gislén está haciendo pruebas a niños suecos; quiere determinar si se aprende a enfocar bajo el agua. “Los datos preliminares dan a entender que es una capacidad que, en muy buena medida, se puede adquirir con la práctica”, comenta.

—Philip Yam



Las pupilas contraídas indican que los moken enfocan bajo el agua

JEREMY WOODHOUSE *Photodisc/Getty (arriba)*; PIERRE PERRIN *Corbis sygma (abajo)*

FISIOLOGIA

Reparación muscular

El desgaste diario acaba por sembrar de minúsculos poros las membranas musculares. Pero las células sanas se remiendan rápidamente expidiendo un ejército de vesículas, que portan a los lugares necesitados sustancias químicas con las que se tapona el poro. Entre 10 y 30 segundos bastan. A partir de la investigación con ratones se ha observado que la sustancia reparadora clave es una proteína, la disferlina. La ausencia de ésta provoca dos raros tipos de distrofia muscular: la miopatía de Miyoshi y la distrofia muscular de las extremidades y la cintura (tipo 2b). En tales distrofias los músculos no pueden ser reparados al mismo ritmo con que se dañan. La disferlina puede que contribuya a preservar la salud de las células en otros órganos: reside en el corazón, el cerebro y los tejidos del oído.

—Laura Wright

El uso de los músculos desgarra unas membranas que deben ser reparadas

ECOLOGIA

Lluvias de ayer y fuegos de hoy



Las predicciones relativas a los incendios forestales se fundamentan sobre todo en los pronósticos meteorológicos del verano de que se trate; se alerta a los servicios de extinción de un riesgo acrecentado de propagación del fuego sólo con unas semanas de antelación. Pero la advertencia podría llegar incluso un año antes, como poco: el clima a largo plazo cuenta aún más que el tiempo que haga en los últimos días. Anthony L. Westerling y sus colaboradores, de la Institución Scripps de Oceanografía, han correlacionado más de 20 años de registros del clima y de la vegetación con las estadísticas de los fuegos. Su análisis descubre que la inflamabilidad de las regiones abandonadas depende sobre todo de las lluvias de los veranos anteriores. Si una sequía persistente agosta pastos y monte bajo, los incendios del año siguiente en la misma zona serán menos graves. En los bosques suele pasar lo contrario: la sequía reduce la proliferación de la vegetación, pero la vuelve más combustible.

—Sarah Simpson

El tiempo que hizo antes predice mejor que el de hoy la inflamabilidad de los bosques, pastos y monte bajo

ENTOMOLOGIA

Avispas eléctricas

Las avispas podrían refrescarse con pulsos de electricidad. Así lo afirma un grupo de biólogos y físicos de la Universidad de Tel Aviv. Unas imágenes en infrarrojos de unas avispas anestesiadas en sus nidos mostraron que la cutícula que rodea algunas partes de su cuerpo, el abdomen por ejemplo, tenía una temperatura tres grados inferior que el nido. La evaporación que se produce en la boca no explica el enfriamiento abdominal; se debería más bien a las propiedades termoeléctricas de la cutícula. Los materiales dotados de tal capacidad cambian de temperatura cuando los atraviesa una corriente eléctrica. Pero Allen Gibbs, experto en la fisiología de los insectos, cree que cabe dentro de lo posible que el enfriamiento evaporativo sea la causa. Hasta que no se hayan estudiado las conductividades térmica y eléctrica, e investigado la pérdida de agua y la actividad metabólica de las abejas, Gibbs seguirá escéptico.

—J. R. Minkel



Las avispas orientales (Vespa orientalis), *aquí devorando carne cruda, quizá se refresquen por medio de la electricidad*

PURE/NONSTOCK (*arriba*); DAVID McNEW *Getty* (*centro*); KRIS MERCER (*abajo*)

Contaminación de acuíferos por gasolina

Los aditivos oxigenados de la gasolina sustituyeron a los derivados del plomo. ¿En que medida uno de ellos, el metil tert-butil éter, afecta a la calidad de las aguas?

Mónica Rosell, Sílvia Lacorte y Damià Barceló

En los últimos años ha crecido la inquietud ante un agente que parece atentar, de una manera sutil e insidiosa, contra la salud humana. No se trata de ningún virus, bacteria o protozoo, sino de algo cuyo culpable directo es el propio hombre. Nos referimos al metil tert-butil éter (MTBE), un nuevo aditivo antidetonante presente en las gasolinas. La molécula ha pasado a ocupar un primer plano en el debate sobre la potabilidad y calidad del agua.

Ya en 1995 un estudio sobre la situación norteamericana daba cuenta de la presencia habitual de este compuesto orgánico volátil en las aguas subterráneas urbanas; aparecía en un 27 % de las muestras, sólo por detrás del cloroformo (un 28 %). Otro trabajo, del año 2000 y referido al Viejo Continente, cifraba en más de un 50 % la fracción de la población europea expuesta a niveles bajos de MTBE (alrededor de 0,1 microgramo por litro) en el agua de abastecimiento, como resultado de fuentes difusas de contaminación, y entre un 0,1 y un 1 % a niveles perceptibles (más de 15 microgramos/l), procedentes de fuentes definidas. Por lo que a España concierne, la investigación desarrollada por los autores sobre la situación en Cataluña confirma la contaminación de las aguas subterráneas próximas a gasolineras y refinerías.

Historia del octanaje

Dada la importancia del uso de los combustibles fósiles para el transporte, en los últimos veinte años se ha puesto un creciente empeño en promover un cambio sustancial de la composición de las gasolinas para evitar algunos de sus efectos negativos sobre el medio y, en particular, sobre la salud. A ese fin responden la reducción y posterior prohibición de los aditivos plomados, así como la limitación continua de los compuestos aromáticos (sobre todo del benceno). Se han introducido nuevos aditivos oxigenados para adecuar el octanaje de las gasolinas.

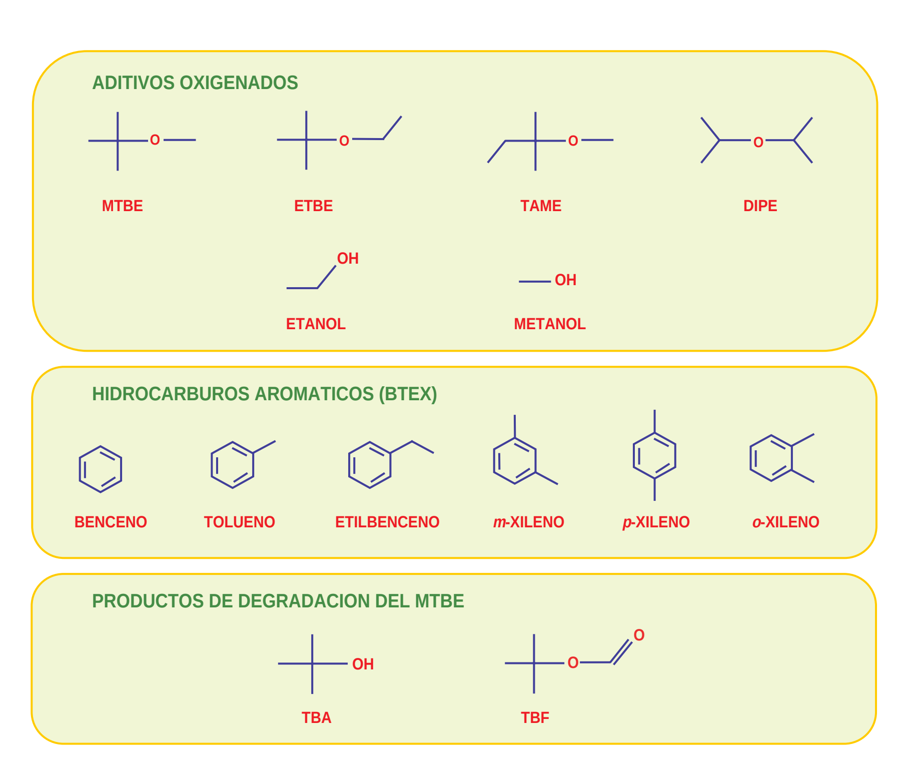
El octanaje, o número de octanos, es una medida de la calidad y capacidad antidetonante de las gasolinas. Cuando la gasolina se quema dentro del cilindro del motor del automóvil, la explosión debe empujar el pistón de forma suave y continua. Pero si la combustión es demasiado rápida, se produce una detonación que hace que el pistón reciba un golpe brusco, con la consiguiente pérdida de eficiencia del motor. Las gasolinas con un alto número de octanos producen una combustión suave y eficiente, es decir, liberan la máxima cantidad de energía útil. La calidad octanal de una gasolina se mide usando una escala arbitraria, en

la que se asigna al isooctano un poder antidetonante de 100 y al heptano (muy detonante) de 0.

Desde los años veinte del siglo pasado se ha venido utilizado el plomo, en particular el tetrametil plomo ($Pb(CH_3)_4$), como aditivo antidetonante. Sin embargo, la emisión atmosférica de partículas de plomo genera serios problemas de salud pública, por lo que terminó prohibiéndose. El plomo inhalado se acumula en los pulmones y afecta a los sistemas hematopoyético, renal, cardiovascular y neurológico. Obstaculiza la síntesis de hemoglobina con resultado de anemia. Se supone, además, que la presencia de altos niveles de plomo en sangre atenta contra el desarrollo intelectual y la conducta de los niños.

En la forzada sustitución de los aditivos plomados ha intervenido también la incorporación del catalizador, totalmente incompatible con el plomo, en los automóviles. El conversor catalítico (generalmente platino, rodio u óxidos de metales de transición) reduce, hasta en un 85 %, las emisiones contaminantes de monóxido de carbono, hidrocarburos u óxidos de nitrógeno. Lo consigue al facilitar la transformación de los mismos en otros compuestos menos agresivos: dióxido de carbono, agua y nitrógeno atmosférico.

Al propio tiempo, hemos asistido a un fenómeno paralelo, el desarrollo de nuevos combustibles sin plomo a partir de sustancias aromáticas —benceno, tolueno y otros—, isoparafinas y compuestos oxigenados.



1. ESTRUCTURA de los aditivos antidetonantes de la gasolina más comunes y los principales productos de degradación del MTBE.

Aditivos oxigenados

La introducción paulatina de los aditivos oxigenados en la gasolina empezó en los Estados Unidos a finales de los años setenta. Se pretendía adecuar el octanaje en la primera fase de reducción del contenido de plomo. Se trataba principalmente de éteres y alcoholes, compuestos que, además de proporcionar un elevado número de octanos, ofrecen una mayor oxigenación, lo que comporta una combustión más completa y un mejor funcionamiento de los motores.

Hubo que esperar, sin embargo, hasta mediados de los años noventa para su generalización, con la aplicación de la ley sobre contaminación, de alcance federal, que señalaba, entre otros puntos, la cuantía permitida de liberación atmosférica de monóxido de carbono y de formación de ozono en determinadas zonas y estaciones del año. Para resolver el problema de las emisiones de monóxido de carbono, se indicó un "combustible oxigenado" (OXY), que debía contener no menos de un 2,7 % de oxígeno en peso, favoreciendo la combustión más completa de los hidrocarburos de la gasolina.

Para limitar la formación de ozono comenzó a utilizarse, más tarde, una "gasolina reformulada" (RFG) con no menos de un 2 % de oxígeno en peso y con unos niveles inferiores de benceno y otros compuestos aromáticos, potencialmente carcinógenos para el hombre. La nueva gasolina produce menores emisiones atmosféricas de estos compuestos sin quemar, frenando así la formación de ozono estratosférico en zonas urbanas. Gracias a su empleo, han bajado las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, óxidos de nitrógeno y otros compuestos tóxicos en un 17, 2 y 17 %, respectivamente, frente a la gasolina que venía sirviéndose.

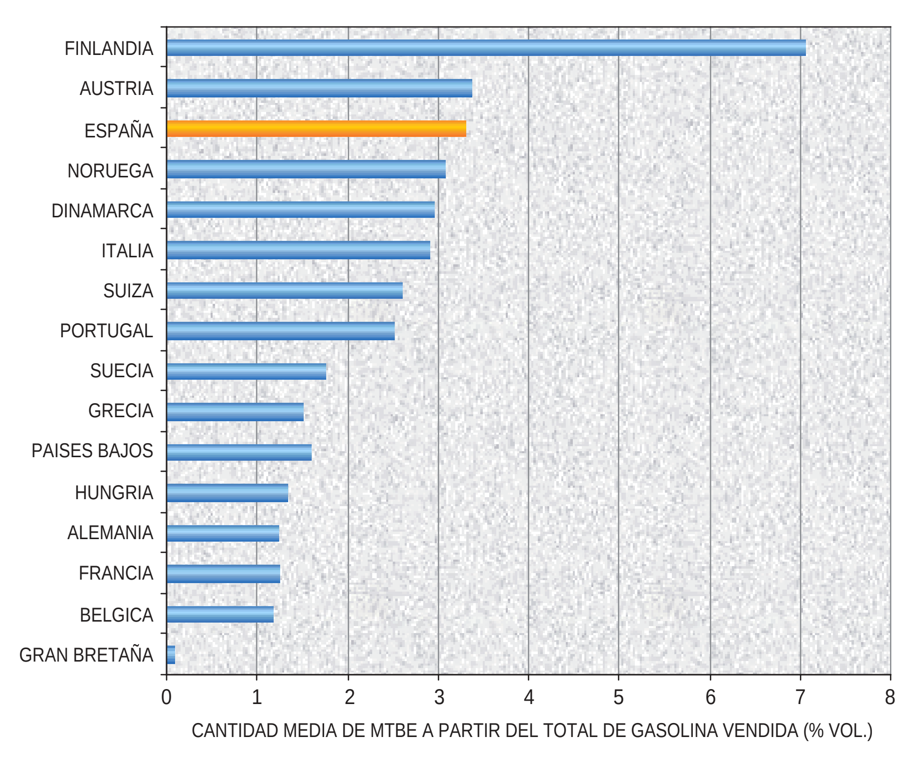
Con la nueva gasolina reformulada se pretende llegar a una reducción del 27 % en emisión de compuestos orgánicos volátiles, un 7 % en óxidos de nitrógeno y un 22 % en otros compuestos tóxicos. Se ha conseguido ya una reducción de 64.000 toneladas de contaminación, equivalentes a la eliminación de 10 millones de vehículos de gasolina común y el impacto de 16 millones de vehículos.

Los aditivos oxigenados se han añadido en más de un 30 % del volumen total de la gasolina utilizada en los Estados Unidos. El más empleado ha sido el metil *tert*-butil éter (MTBE), seguido por el etanol y otros de uso más limitado como el metanol, el *tert*-butil alcohol (TBA), el etil *tert*-butil éter (ETBE), el *tert*-amil metil éter (TAME) o el diisopropil éter (DIPE).

El metil tert-butil éter (MTBE)

Se ha optado por el MTBE en razón de su bajo coste y fácil producción, alto número de octanos, baja evaporación desde la gasolina,

MONICA ROSELL, SILVIA LACORTE Y DAMIA BARCELO



2. USO del MTBE en Europa.

buena mezcla con ésta sin separación de fase y favorable transferencia a través de las tuberías. De fórmula molecular $CH_3{—}O{—}C(CH_3)_3$, se sintetiza en las refinerías a partir de metanol e isobutileno.

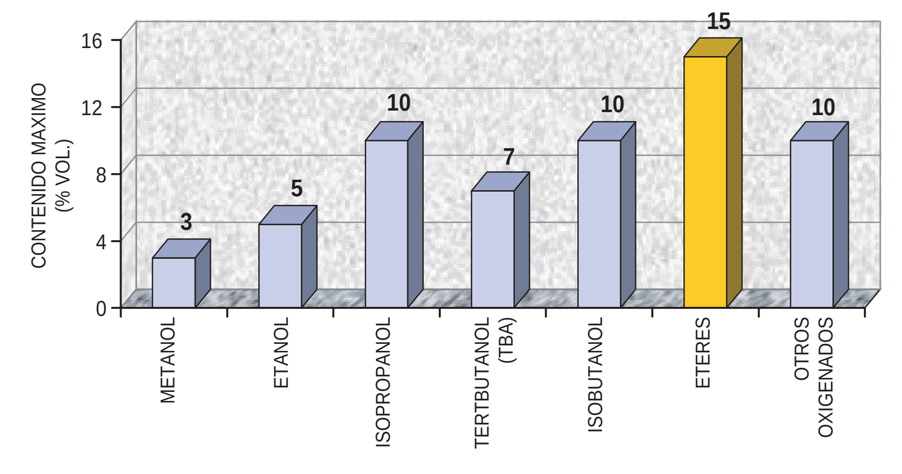
En los últimos años el MTBE ha protagonizado un notable crecimiento productivo. Si en 1970 figuraba en el número 39 de los compuestos químicos orgánicos fabricados en Estados Unidos, en 1998 subió al cuarto lugar, con una producción agregada de unos 60 millones de toneladas métricas durante este período; sólo superado por los monómeros (etileno, propileno y 1,2-dicloroetano) utilizados para sintetizar polietileno, polipropileno y cloruro de polivinilo en la fabricación de plásticos.

Aunque con cierto retraso, el MTBE se introdujo también en Europa. En Italia, pionera, se empezó a fabricar en 1973. En los ochenta se generalizó en el continente. Con el fin de prevenir problemas técnicos, las refinerías añadieron inicialmente cantidades desmesuradas de MTBE y aumentaron el contenido de compuestos aromáticos. Afortunadamente, las nuevas técnicas de refinación, piénsese en la introducción de motores mejorados capaces de funcionar con gasolina de menor número de octanos (sin plomo 95), frenaron y estabilizaron su contenido en los noventa.

La proporción de aditivos oxigenados en la gasolina europea es mucho menor, y más uniforme, que en los EE.UU. Si el contenido del aditivo en las gasolinas oxigenadas norteamericanas ronda el 10-15 % en volumen, la media europea (calculada a partir del sumatorio de todos los grados u octanajes de gasolina de cada país) es inferior al 4 % en todos los casos, salvo en Finlandia con un 7,5 %. Sin embargo, ninguno de estos países sobrepasa el contenido máximo permitido por la normativa europea, establecido en un 15 % en volumen para los éteres de cinco o más átomos de carbono por molécula.

Con respecto a la producción de MTBE, se ha estimado que ronda los 3 millones de toneladas anuales dentro de la Unión Europea, cifra ampliamente superada por los EE.UU., donde se consumen alrededor de 8-10 millones de toneladas al año. No obstante, la cifra europea podría estar subestimada, ya que se basa en datos anteriores a la entrada en vigor de la Directiva 98/70/CE, es decir, antes del 1 de enero de 2000; prohíbe ésta el uso de gasolina plomada y restringe el contenido en benceno y otros aromáticos.

La regulación europea se ha ido incorporando progresivamente a nuestra legislación nacional. La distribución y utilización de los compuestos oxigenados en la gasolina se permitió a partir del 1 de enero de 1988 y la venta al público de gasolina sin plomo antes de junio de 1989. La más reciente incorporación, con fecha 12 de noviembre de 1999, adopta la Directiva europea, fijando las especificaciones de gasolinas y gasóleos para 2000 y 2005. Dentro del ranking europeo sobre contenido medio de MTBE en la gasolina, España ostenta la tercera posición con un 3,45 % en volumen, sólo por detrás de Finlandia y Austria.



MONICA ROSELL, SILVIA LACORTE Y DAMIA BARCELO

3. REGULACION europea actual de los aditivos oxigenados (Directiva 98/70/CE).

4. TANQUE SUBTERRANEO de almacenaje de gasolina. Muestra una severa erosión.



Lucha contaminante contra la contaminación

Sin embargo, lo que nació en EE.UU. con la loable intención de reducir la contaminación atmosférica, se ha tornado en un grave problema ambiental al poner en peligro la calidad de los recursos hídricos. Por su propia naturaleza fisicoquímica, el MTBE constituye una amenaza para la salubridad de las aguas subterráneas. Se trata de un compuesto orgánico volátil con elevada solubilidad en agua, fácil movilidad, difícil degradación en el subsuelo y propiedades organolépticas desagradables.

El MTBE pasa al medio a través de fuentes de contaminación, definidas o difusas, relacionadas con la fabricación, transporte, almacenaje y uso de la gasolina. Las fuentes definidas son las que provocan unas concentraciones más elevadas del compuesto en las aguas freáticas (de hasta 200 miligramos/l o ppm). Pertenecen a este tipo las fugas por corrosión de los tanques subterráneos de almacenaje de gasolina, así como las pérdidas gaseosas y líquidas de surtidores y tuberías.

Cuando las concentraciones son bajas (de 0,2 a 3 microgramos/l o ppb), nos hallamos, por lo general, ante fuentes difusas: emisiones de los vehículos, deposición atmosférica e infiltración en el subsuelo. Este compuesto muestra, en efecto, afinidad por la fase acuosa, acompañándola en el ciclo hidrológico.

La repartición del MTBE entre el agua y la gasolina de la fuga se ve afectada principalmente por su elevada solubilidad. A partir de una gasolina oxigenada con un 10-15 % en volumen del aditivo, la solubilidad en agua a temperatura ambiente sería de 5000 miligramos por litro, mientras que la de otro aditivo, el benceno de una gasolina común (con un 1 % volumen), sólo sería de 18 miligramos por litro.

Por su parte, el intercambio de un contaminante entre el aire y el agua viene condicionado por su constante de Henry (H). Un compuesto con un valor de la constante adimensional de Henry (H/RT) superior o igual a 0,05 se considera muy volátil desde el agua; con un valor inferior tenderá a pasar a la fase acuosa o permanecer en ella. Tal es el caso del MTBE: con un valor de 0,022 a 25 ºC se repartirá sustancialmente dentro de las aguas, como lo hará también en la formación de gotas de lluvia.

En consecuencia, allí donde concurran concentraciones elevadas de MTBE en la atmósfera debido a fuentes locales (autopistas, gasolineras, garajes o refinerías) se incrementará la concentración del éter en la precipitación; luego, a través de la infiltración, llegará a las aguas subterráneas.

Aun cuando el MTBE o los hidrocarburos aromáticos sean mucho más solubles en el agua que la mayoría de los compuestos orgánicos presentes en la gasolina, se adsorberán parcialmente en los sólidos del subsuelo; entendiendo por éstos los suelos, los materiales profundos de la zona insaturada y los materiales de los acuíferos. Se ha estimado que alrededor de un 8 % del MTBE presente en las aguas podría ser adsorbido por los materiales del acuífero; por mor de comparación, se adsorbería un 40 % de benceno o un 72 % de etilbenceno. Respecto a la movilidad dentro del acuífero, el MTBE procede a velocidades similares a las del agua subterránea.

Lenta degradación

Pero el problema no termina con su intrusión en las aguas subterráneas. Una vez allí, persiste largo tiempo. Los éteres se caracterizan por no reaccionar ante un amplio rango de condiciones industriales y de laboratorio. Resulta poco probable que el MTBE se degrade rápidamente en el medio acuático.

En términos generales, la degradación de un compuesto orgánico se refiere a su transformación mediante reacciones bióticas o abióticas para terminar formando otros compuestos orgánicos. Hasta que tiene lugar la última mineralización (o rotura completa) en dióxido de

Los autores

MONICA ROSELL, SILVIA LACORTE y DAMIA BARCELO trabajan en el Departamento de Química Ambiental del Centro de Investigación y Desarrollo del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de Barcelona. Barceló, profesor de investigación, coordina un grupo de cinco proyectos sobre contaminación de aguas residuales financiado por la Unión Europea. Lacorte ha dirigido el Programa de Vigilancia Ambiental de las Aguas Superficiales de Portugal. Rosell prepara su tesis sobre el análisis y degradación del metil tert-butil éter en aguas subterráneas bajo la supervisión de Barceló y Lacorte.

MONICA ROSELL, SILVIA LACORTE Y DAMIA BARCELO

carbono y agua, pueden haberse desarrollado numerosas reacciones durante un largo período de tiempo.

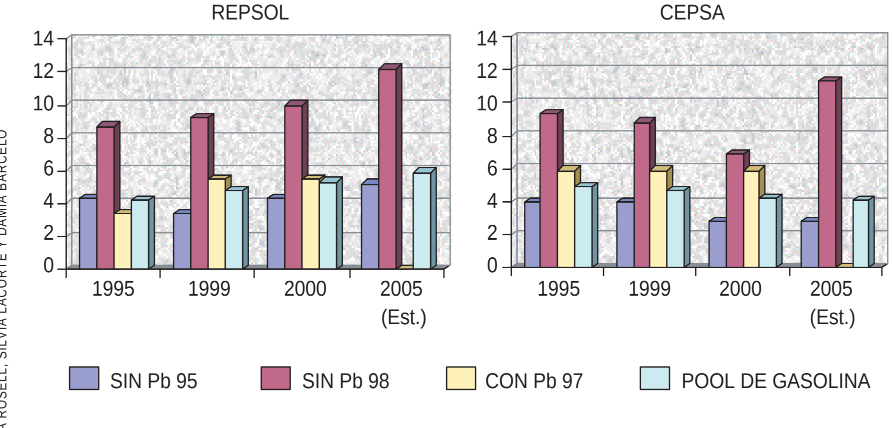
En la atmósfera el MTBE se degrada con mayor celeridad. Intervienen procesos de fotolisis, así como reacciones con el radical hidroxilo (OH^-), el ozono (O_3) o los radicales nitrato (NO_3). De éstas predomina la reacción del radical hidroxilo. Con una concentración típica de 106 radicales por centímetro cúbico, la vida media del MTBE en la atmósfera se cifra en unos 4 días. (Llámase vida media al tiempo necesario que se requiere para rebajar la concentración de un compuesto en un 50 %.) En todos los casos, el principal producto de degradación atmosférica es el *tert*-butil formiato (TBF).

En la degradación química del MTBE en las aguas superficiales intervienen la velocidad de la corriente, la profundidad o la temperatura, entre otras variables. Atendiendo a las mismas, varía. Por eso, el valor de su vida media oscila dentro de un amplio intervalo, desde 52 días en las condiciones más desfavorables (aguas muy calmadas: 0,032 m/s; frías: 5 ºC, y profundas: 10 m) hasta 30 minutos en condiciones óptimas (aguas rápidas: 3,2 m/s; templadas: 25 ºC, y de poca profundidad: 0,1 m).

Pero donde el MTBE se convierte en una amenaza real es en las aguas subterráneas. Allí su degradación resulta mucho más difícil. En ausencia o baja concentración de cualquier radical, la hidrólisis progresa con suma lentitud, pudiendo considerarse despreciable la transformación abiótica.

Por lo que concierne a la biodegradación de nuestro aditivo, se han encontrado microorganismos capaces de degradarlo bajo condiciones aeróbicas en el microcosmos de laboratorio. No es, sin embargo, la norma. Si en presencia de oxígeno no se produce transformación hasta al cabo de 100 días de incubación, en ausencia de éste procede con mayor lentitud, si es que se da. La dificultad reside en la resistencia al ataque microbiano que presentan los átomos de carbono terciarios y en la fuerte estabilidad y poca reactividad del grupo éter. Cuando se logra la degradación, se forma TBA.

5. FUGAS DE GASOLINA producidas en tuberías subterráneas de estaciones de servicio.



MONICA ROSELL, SILVIA LACORTE Y DAMIA BARCELO

6. EVOLUCION del contenido (porcentaje en volumen) de MTBE en España a través de las principales compañías petroleras del país.

En el punto de mira

Todas estas investigaciones previas sobre el comportamiento del MTBE se han confirmado a escala ambiental. Se ha apreciado un incremento considerable en la frecuencia de detección de MTBE, lo mismo en aguas subterráneas que superficiales. Así las cosas, y ante la posibilidad de que ese éter llegue a las aguas de consumo humano, la Agencia norteamericana de Protección del Medio Ambiente (EPA) estableció en 1997 unos niveles aconsejables en el agua potable, que van de 20 a 40 microgramos por litro, con el fin de evitar sus desagradables propiedades organolépticas y de establecer unos márgenes de seguridad frente a sus efectos carcinógenos potenciales a corto y largo plazo.

En Europa, a falta de normativa que obligue a realizar análisis de MTBE en el agua potable, algunos países se han sumado a la EPA y han propuesto sus propios valores guía. Dinamarca ha sugerido unas concentraciones máximas de MTBE en las aguas de consumo de 350 microgramos por litro para la toxicidad y 30 microgramos/l respecto el gusto y el olor. Suiza considera contaminadas las aguas a partir de 200 microgramos por litro; aplica el principio de precaución a partir de 2 microgramos/l, basándose en que éste es un posible indicador de contaminación por gasolina. Se trata de

concentraciones muy bajas. Aunque la presencia o ausencia de las propiedades organolépticas molestas en el agua potable no guarden correlación con su toxicidad potencial, muchos consumidores asocian un gusto u olor desagradable a aguas corrompidas o insalubres.

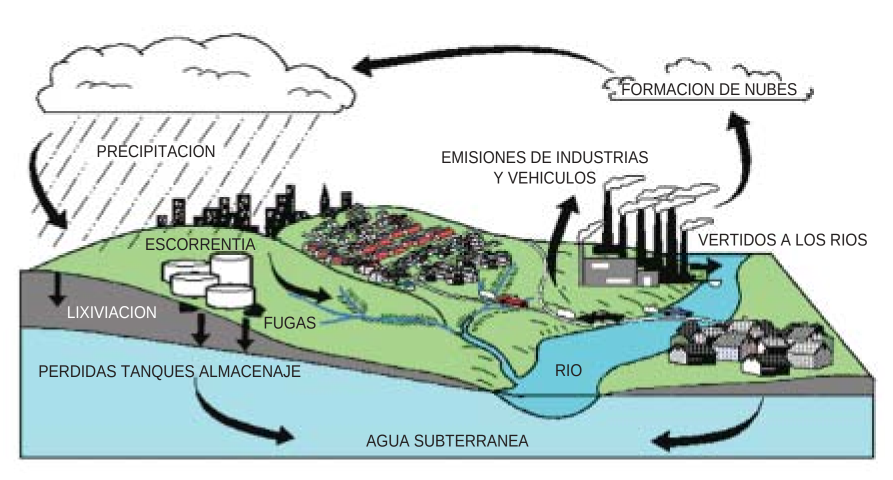
No resulta fácil acotar unos umbrales precisos de gusto y olor en las aguas. La sensibilidad siempre es subjetiva. Dicho de otro modo, no todos los individuos perciben igual una misma concentración de la sustancia de estudio. En consecuencia, para el MTBE se han establecido unas concentraciones aproximadas de 25 a 60 microgramos por litro con respecto al gusto y de 40 a 70 microgramos/l en punto al olor; el aroma resulta más difícil de percibir. De todas formas, estas concentraciones son sumamente bajas si las comparamos con las de otros aditivos de la gasolina como el etanol (olor: 49.000 microgramos por litro) o el benceno (gusto y olor: 500 microgramos/l).

Toxicidad del MTBE

Se debate si este compuesto debe o no considerarse cancerígeno. Los primeros problemas de salud relacionados con el MTBE liberado a la atmósfera se detectaron en Fairbanks (Alaska) en 1992. Al poco de su introducción, unos 200 residentes sufrieron dolor de cabeza, irritación de los ojos, quemazón de nariz y garganta, tos, desorientación y náuseas. No fue un episodio aislado. La extensión del aditivo por los Estados Unidos se vio acompañada de registros hospitalarios similares. Se acometieron entonces diversos estudios epidemiológicos.

De los resultados obtenidos se desprendía que una exposición controlada al MTBE en el laboratorio no causaba un incremento estadísticamente significativo de los síntomas de irritación. Aunque estos estudios no pudieron confirmar ni descartar la existencia de efectos agudos sobre la salud de la población, sí pusieron de manifiesto la relación entre concentración de MTBE en sangre y concentración de éste en el aire; los sujetos más expuestos (empleados de gasoline-

MONICA ROSELL, SILVIA LACORTE Y DAMIA BARCELO



7. CICLO del MTBE en el medio.

ras y mecánicos) presentaban las concentraciones más elevadas en sangre (entre 0,05 y 37 microgramos por litro); los propios conductores habituales mostraban niveles considerables (de 0,05 a 2,6 microgramos/l).

¿Qué se sabe de sus efectos cancerígenos? La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer ha incluido el aditivo dentro del grupo 3, es decir, "inclasificable como cancerígeno en humanos", no en el grupo cuarto, que supondría reputarlo "probablemente no cancerígeno". Comparte grupo con la cafeína, entre otros. Por su parte, la Agencia norteamericana de Protección del Medio Ambiente (EPA) lo ha incluido provisionalmente dentro del grupo C, "cancerígeno potencial para los humanos", porque las pruebas realizadas en animales abonan su oncogenicidad, aunque tal efecto no se ha corroborado todavía en humanos.

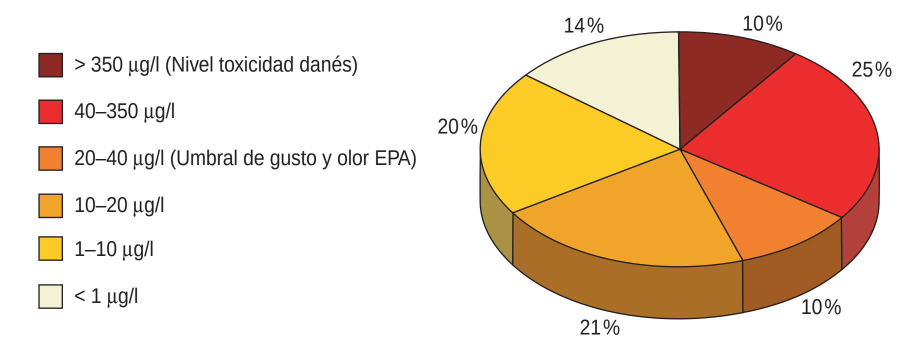
En el organismo, el MTBE se absorbe rápidamente y se difunde por los tractos respiratorio y gastrointestinal. El compuesto y su metabolito más importante, el TBA, son los principales productos de excreción respiratoria. Los estudios en animales de laboratorio han confirmado la tumorogenicidad del TBA.

Pero el MTBE ofrece un lado más positivo. Se utiliza en terapéutica para disolver cálculos biliares, sin que se hayan detectado en ellos los efectos adversos de las personas expuestas por razón de su trabajo, ni siquiera cuando en el tratamiento se alcanzaron concentraciones en sangre superiores a 40.000 microgramos por litro, es decir, unas 1000 veces más elevadas que las habituales en empleados de surtidores y mecánicos.

Un debate científico y político

En 1998 y 1999, la EPA convocó una serie de reuniones de expertos en salud pública, con la participación de científicos, representantes del sector petroquímico, compañías de aguas y autoridades locales y estatales, para debatir los beneficios y perjuicios del uso de los aditivos oxigenados. En el informe posterior elaborado se llegó a la conclusión de que, a partir de la introducción de MTBE, habían aumentado las detecciones de este compuesto en las aguas de consumo. Alrededor de un 5-10 % de los suministros de agua de las zonas analizadas mostraban cantidades detectables del aditivo, y aunque la mayoría se encontraban por debajo del umbral de peligrosidad, empezaban ya a notarse efectos organolépticos desagradables.

Por lo que concierne a Europa, la Agencia de Medio Ambiente Alemana (UBA) ha recomendado un incremento del uso de MTBE en sustitución del contenido de benceno y otros aromáticos en la gasolina. Sin embargo, el ministro danés de Energía y Medio Ambiente anunció planes para elaborar un impuesto sobre este aditivo en un esfuerzo de reducir su uso. En la misma línea, los departamentos de



8. CLASIFICACION de los niveles de MTBE encontrados en Cataluña entre 1998 y 2001.

medio ambiente de los Países Bajos, Suiza y el Reino Unido han iniciado estudios a escala nacional para investigar los problemas derivados del uso intensivo del MTBE. El Instituto de Medio Ambiente Finlandés está llevando a cabo una importante valoración de riesgos para la Unión Europea.

Se está empezando a recoger los primeros frutos. Un reciente documento de la Comisión Europea incluía el MTBE entre las cinco sustancias prioritarias sobre las cuales hay que emprender acciones. Respecto a las aguas subterráneas se menciona que "es necesario establecer unas medidas específicas que limiten los riesgos ligados al MTBE"; a la hora de considerar la potabilidad de las aguas "tendrán que tenerse en cuenta el gusto y olor de éstas". Además, la prevención de toda intrusión antropogénica en las aguas subterráneas, donde se encontraría incluido este aditivo, es un objetivo clave de la actual legislación europea. Se recomienda, en particular, que se establezcan, armonicen y normalicen técnicas de construcción y operación de los tanques de almacenaje de gasolina.

España

En ese marco europeo se inscriben las investigaciones que estamos llevando a cabo en el Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales de Barcelona y la Agencia Catalana del Agua. Esos estudios se integran en el proyecto WATCH ("Water Catchment Areas: Tools for Management and Control of Hazardous Compounds"), que tiene por objeto el desarrollo de técnicas de vigilancia y control de compuestos peligrosos en el suelo y las aguas subterráneas, la elaboración de una base de datos sobre el comportamiento y la presencia de éstos en diferentes zonas europeas contaminadas (caracterización ambiental). El interés se centra en la detección, identificación y cuantificación de hidrocarburos aromáticos y compuestos oxigenados en aguas y suelos.

Para ello, se ha procedido a la optimización de métodos automatizados para el análisis de MTBE, sus principales productos de degradación (TBA y TBF), así como otros aditivos de la gasolina, por técnicas de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS).

Los primeros resultados de este estudio, iniciado en enero de 1998 y que abarca un total de 49 pozos repartidos por la geografía catalana, confirman la presencia de MTBE en todas las muestras analizadas, con niveles similares a los encontrados en el resto de Europa. En general, los valores detectados varían dentro de un amplio intervalo que va desde 0,3 a 350 microgramos por litro, a excepción de 5 puntos "calientes" de elevada contaminación, que oscilan entre 0,6 y 13 miligramos/l (ppm). Además, un 45 % de las muestras presentan una concentración superior a 20 microgramo/l, umbral de gusto y olor fijado por la EPA.

Torsten Schmidt acaba de presentar una recopilación de episodios de contaminación de aguas subterráneas cercanas a fuentes puntuales de MTBE en Europa. Se muestran valores máximos que van desde 120 microgramos/l en los Países Bajos y 830.000 microgramos/l en el Reino Unido, intervalo donde se encuentran también Dinamarca, Finlandia, Francia, Suiza y Alemania. En España la concentración máxima detectada hasta el momento es de 13.200 microgramos/l (13,2 ppm), comparable con el resto de países europeos.

El resto de oxigenados presenta concentraciones muy bajas —por debajo de 1 microgramo por litro—, si es que se detectan. En cambio, los hidrocarburos aromáticos oscilan entre 0,02 y 10 microgramos/l, pudiendo en algunos casos superar el miligramo por litro. Sin embargo, estos compuestos suelen encontrarse mayoritariamente muy por debajo de los valores de MTBE. Tal diferencia cabe atribuirla a su menor solubilidad y movilidad en el suelo, así como a una mayor biodegradación.

Por otro lado, se ha detectado la presencia de TBA, principal producto de degradación del MTBE, en las muestras más contaminadas. Este hecho podría indicar, aunque no probar, su degradación en el subsuelo, pues el TBA podría hallarse en la gasolina original, ya sea como aditivo (raramente empleado en Europa) o bien como subproducto del MTBE. Si bien queda mucho trabajo por realizar, nuestro estudio preliminar, el primero en su género en el sur de Europa, ha puesto ya de manifiesto la emergente contaminación de las aguas subterráneas. Compete a la administración tomar las medidas oportunas.



Bibliografía complementaria

FINNISH ENVIRONMENTAL INSTITUTE, CHEMICALS DIVISION. RISK ASSESSMENT METHYL TERTIARY-BUTYL ETHER. Borrador, Helsinki; 2000.

USE AND OCCURRENCE OF FUEL OXYGENATES IN EUROPE. Torsten C. Schmidt *et al.* en *American Chemical Society Symposium Series*, dirigido por A. F. Díaz y D. L. Drogos, vol. 799, págs. 58-79; Washington D.C., 2001.

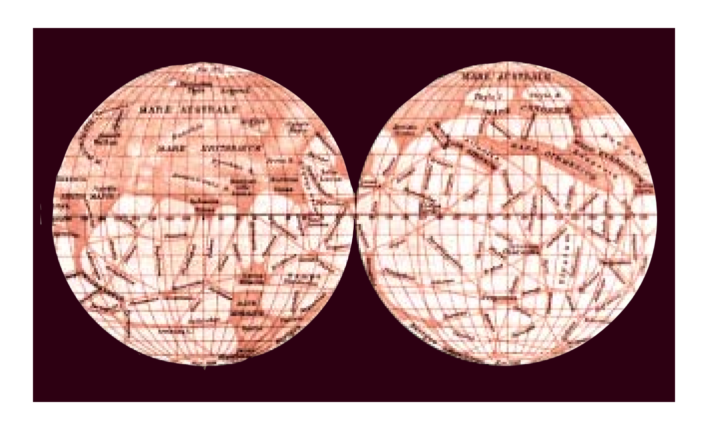
MTBE: EFFECTS ON SOIL AND GROUNDWATER RESOURCES. James Jacobs, Jacques Guertin y Christy Herron. Lewis Publishers, 2001.

Marte, un planeta singular

La actuación conjunta de agua, hielo y viento ha esculpido el paisaje del planeta rojo a lo largo de miles de millones de años. Aunque los procesos que intervinieron en su conformación comparten características con los que operan en la superficie de la Tierra, divergen en rasgos sustanciales

Arden L. Albee

El capitán John Carter, héroe de las novelas de aventuras de Edgar Rice Burroughs, era un caballero de Virginia y oficial de la Confederación. Al quedar arruinado tras la Guerra Civil, marchó en busca de oro hacia Arizona y, cuando era perseguido por guerreros apaches, cayó y se golpeó la cabeza. Recuperó el conocimiento en un planeta árido con lunas gemelas, poblado por criaturas de seis patas y bellas princesas que denominaban "Barsoom" al lugar. El paisaje guardaba un asombroso parecido con el sur de Arizona. No era muy distinto de la Tierra, sólo más viejo y degradado. "La suya es una dura y cruenta lucha por la existencia en un planeta moribundo", escribió Burroughs en su primera novela.



Lo mismo en los textos disciplinares que en los relatos de fantasía científica, se aborda Marte como una versión de la Tierra en condiciones extremas: menor, más frío y más seco, pero esculpido básicamente por los mismos procesos. Incluso bien avanzado el siglo XX, se creía que en el planeta había cursos de agua y vegetación. La semejanza con la Tierra quedó descartada a finales de los años sesenta, cuando una sonda espacial reveló un mundo árido y salpicado de cráteres, afín a la Luna. Pero con los posteriores descubrimientos de montañas gigantescas, cañones profundos y complejas condiciones meteorológicas se volvió al planteamiento anterior. Las imágenes de la superficie tomadas por las sondas *Viking* y *Mars Pathfinder* ofrecían un notable paralelismo con la Tierra. Como Burroughs, los investigadores comparan las regiones ecuatoriales de Marte con el sudoeste norteamericano. Para las regiones polares, se recurre a otro modelo: los Valles Secos de la Antártida, un desierto helado en un paisaje de hielo infinito.

Pero si los investigadores han aprendido algo de las recientes exploraciones de Marte, es que hay que andar con tiento a la hora de establecer comparaciones de ese tenor. En los últimos cinco años, las sondas espaciales han recogido más información sobre el planeta rojo que en todas las misiones anteriores juntas. Se ha demostrado que Marte es un planeta muy diferente y más complicado de lo que se venía suponiendo. Incluso la cuestión crucial —¿fue Marte alguna vez cálido y húmedo, capaz quizá de albergar la evolución de la vida?— presenta una gama de matices mayor que la imaginada. Para comprender a Marte, es preciso liberarse de la perspectiva terrestre; se trata de un lugar exclusivo.



1. EL LECTOR TARDARIA APROXIMADAMENTE CINCO MINUTOS en recorrer la zona mostrada en esta imagen, que pertenece al sector septentrional del cráter Newton, en el hemisferio meridional de Marte. Dejaría sus huellas en el suelo ligeramente helado (*zonas brillantes*), treparía sobre dunas de arena y otros accidentes levantados por el viento y saltaría sobre hondonadas y otros accidentes excavados por el agua. Tales estructuras probablemente sigan generándose en la actualidad. Al igual que otras imágenes de la sonda *Mars Global Surveyor*, ésta es una composición de una escala de grises de alta resolución y color de baja resolución; los colores sólo son aproximados. Se halla muy alejada de la vaga (y a veces fantasiosa) visión de Marte de hace un siglo (*página izquierda*).

Marte es la morada del polvo

La exploración de Marte ha conocido altibajos. En los últimos diez años, la NASA ha perdido tres sondas: *Mars Observer*, *Mars Climate Orbiter* (prevista como una sustitución parcial de *Mars Observer*) y *Mars Polar Lander*. No obstante, el programa ha cosechado también éxitos recientes. Desde 1997, sin interrupción, la sonda *Mars Global Surveyor* ha venido tomando fotografías, registrando espectros de infrarrojos y recogiendo otros datos. Se ha convertido ahora en la matriarca de una familia entera de sondas espaciales destinadas a Marte. Por su parte, la sonda *Mars Odissey* ha estado girando en órbita alrededor del planeta durante más de un año, cartografiando el contenido de agua del subsuelo y tomando fotografías infrarrojas de la superficie. Acaban de salir hacia Marte dos robots todoterreno, sucesores del famoso *Sojourner* del *Mars Pathfinder*. A cargo de la Agencia Espacial Europea corre la sonda orbital *Mars Express*, con su módulo de aterrizaje *Beagle* 2. Al mismo tiempo que ésta, en diciembre, debería llegar a Marte la sonda orbital *Nozomi*, perteneciente al Instituto Japonés del Espacio y Ciencia Astronáutica, pero no está claro que llegue a superar los problemas que padece.

Los científicos no habían contado hasta ahora con un registro tan exhaustivo de los procesos que operan en la superficie y en la atmósfera. Se han estudiado también los cráteres, los cañones y los volcanes, reliquias espectaculares de un pasado remoto. Pero hay un enorme vacío en nuestro conocimiento. Entre el Marte antiguo y el moderno median miles de millones de años de incógnitas. Nadie sabe con certeza qué condiciones y procesos fueron esculpiendo el planeta a lo largo de la mayor parte de su historia. Por no hablar de la geología del subsuelo, que tendrá que ser tema de un futuro artículo.

El Marte actual difiere de la Tierra en numerosos rasgos generales. De entrada, lo envuelve el polvo. Gran parte de la superficie terrestre consiste en suelo formado por la erosión química de la roca madre subyacente y, en algunas regiones, por rocalla glaciar. La superficie marciana, en cambio, consta en buena medida de polvo, es decir, de material granulado muy fino que se ha depositado desde la atmósfera. Cubre todo el terreno, salvo los accidentes más abruptos, ocultando el paisaje antiguo. Crea una capa gruesa incluso en los volcanes más altos. Se concentra, sobre todo, en las zonas más brillantes del planeta, conocidas desde hace tiempo por los astrónomos.

El polvo crea paisajes de un mundo diferente, como el terreno repleto de hoyos característico. Al asentarse el polvo de la atmósfera, atrapa material volátil y forma una capa de polvo helado. Luego, los hielos volátiles se convierten en gas, dejando hoyos. Llama la atención un fenómeno curioso: el espesor de la capa polvorienta y helada de Marte varía con la latitud. Así, cerca de los polos, *Mars Odissey* nos ha revelado que hasta el 50 por ciento del primer metro de suelo puede ser hielo. En las laderas, la capa helada muestra signos de haberse desplazado como un fluido viscoso, a la manera de los glaciares terrestres. Esta capa ha atraído el interés de la investigación científica.

En segundo lugar, Marte es un planeta sumamente ventoso. Está dominado por la actividad eólica de la misma forma que la Tierra está dominada por la acción del agua líquida. Las sondas espaciales han registrado tormentas de polvo que rodean todo el globo, enormes remolinos y avalanchas de polvo; todo producido por el viento. Las bandas de polvo acumuladas detrás de los obstáculos cambian con las estaciones, debido plausiblemente a las condiciones variables del viento.

Allí donde no está cubierta de polvo, la superficie muestra erosión eólica o deposición. La acción de la erosión se refleja en los cráteres, de los que parece

CORTESIA DE WWW.NIRGAL.NET/SCHEMAS/SCHIAPARELLI–MAP.HTML (*página izquierda*); NASA/JPL/SISTEMAS MALIN PARA LA CIENCIA ESPACIAL MOC 2–320 (*arriba*)

que el viento ha removido material, y en los yardangs, afloramientos de roca madre talladas por la arena transportada por el viento. Las señales de deposición comprenden capas y dunas movedizas de arena. Estas últimas están compuestas de granos, que saltan y rebotan impulsados por el viento. Para elevar en suspensión el polvo, se necesita un viento más fuerte que para iniciar el desplazamiento por saltos. Ese fenómeno es el responsable de la mayor parte del polvo lanzado a la atmósfera.

La actividad eólica parece haber persistido desde el tiempo en que se formaron los grandes cráteres, en la juventud del sistema solar. Muchas imágenes muestran cráteres con grados variables de erosión: algunos, someros, se encuentran parcialmente llenos de depósitos y dunas de arena, mientras que otros, más profundos y con forma de tazón, se revelan intactos. Michael Malin y Kenneth Edgett, de Malin Space Science Systems en San Diego, empresa responsable de la operación de la cámara de la sonda *Mars Global Surveyor*, han sugerido una secuencia de procesos. El viento impulsó la arena por la región; parte de la misma quedó atrapada en cráteres. Luego, se formaron otros cráteres. Se ignora, sin embargo, dónde y cómo se formó tal cantidad de arena y en virtud de qué mecanismo el viento la impulsó.

Cielos de Marte

Marte difiere de la Tierra en un tercer apartado importante. Concierne a su asombrosa variedad de ciclos meteorológicos y climáticos. Aunque los hay similares a los terrestres, abundan los que carecen de parangón. Por ejemplo, el día marciano es casi igual que el día terrestre; un año de Marte, sin embargo, comprende 687 días terrestres. La inclinación del eje de rotación de Marte, que produce las estaciones, es muy próxima a la de la Tierra. Marte carece de precipitaciones y océanos, de vital importancia para la meteorología terrestre. Pero la presión atmosférica (menos de un uno por ciento de la terrestre) varía según las estaciones en aproximadamente un 25 por ciento, influida por la condensación y sublimación de la escarcha de dióxido de carbono de los polos. La tenue atmósfera marciana tiene una capacidad calorífica muy baja, por eso la temperatura en la superficie oscila en más de 100 grados centígrados entre el día y la noche. Las propiedades térmicas de esa atmósfera sutil se ven espectacularmente condicionadas por el polvo y las partículas de hielo suspendidas en la atmósfera. Por consiguiente, pese a su finura, la atmósfera desarrolla una dinámica y unos patrones de circulación complejos. Un informe meteorológico diario nos hablaría de fuertes vientos, nubes de hielo a gran altura, nieblas a baja altura, heladas estacionales, remolinos de polvo y gigantescas tormentas de polvo.

Lo mismo que en la Tierra, los sistemas tormentosos proceden, a menudo, en espiral hacia el sur desde las regiones polares septentrionales. Pero las tormentas de polvo principales acostumbran desencadenarse durante la primavera meridional mientras el planeta experimenta una fase de rápido caldeamiento. Periódicamente se unen y abarcan el planeta entero. La sonda *Mars Global Surveyor* siguió muy de cerca la evolución de una tormenta global de polvo de cuatro meses, que comenzó en junio de 2001. En contra de lo que se esperaba, no se trató de una tormenta global simple, sino de la confluencia de varias tormentas regionales. Malin ha comparado el efecto climático del polvo levantado por esa tormenta con la etapa posterior a la erupción del Monte Pinatubo en la Tierra en 1991: un enfriamiento breve y extenso.

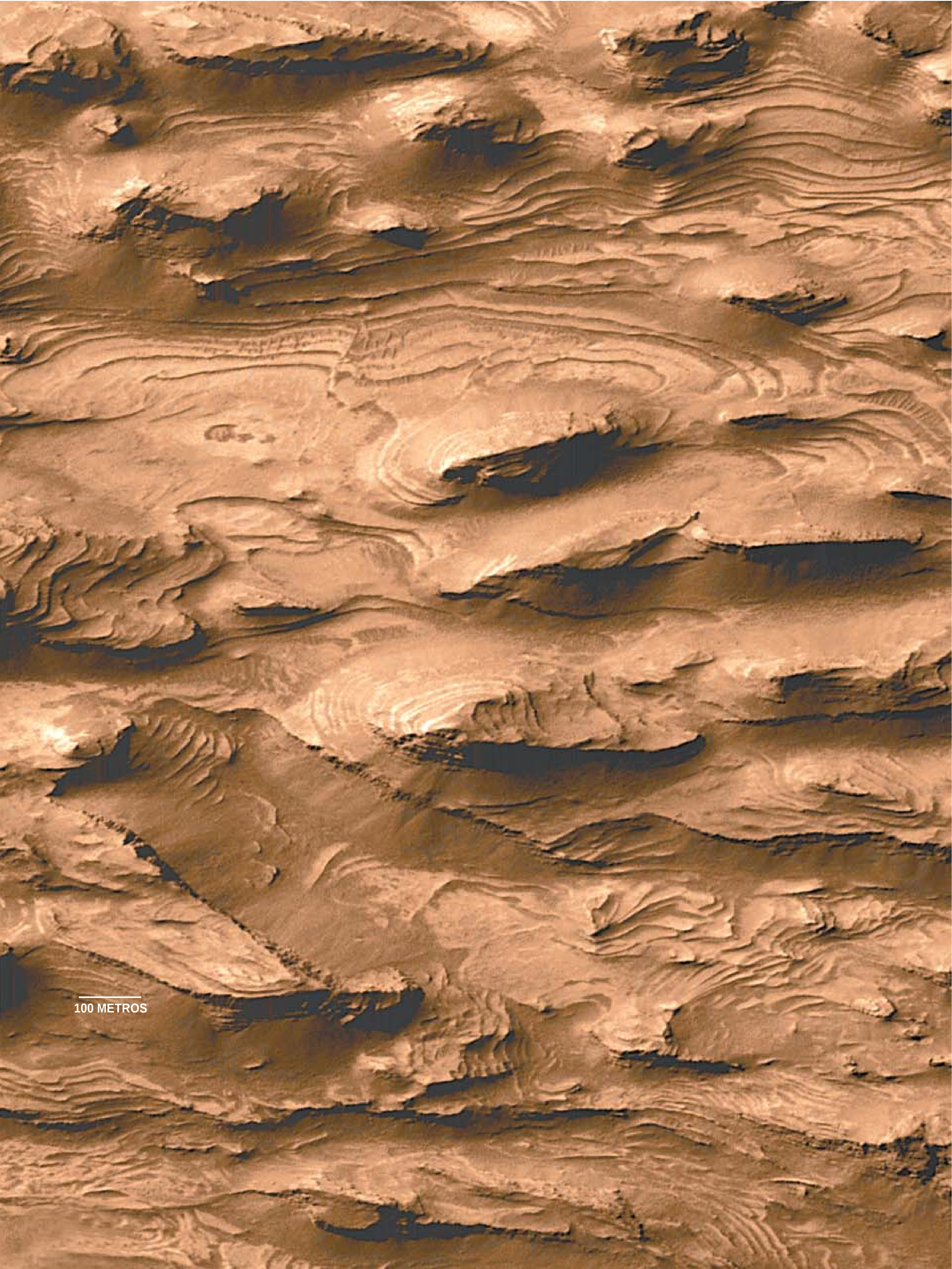
Los casquetes de hielo polar desempeñan una función decisiva en los ciclos atmosféricos. De su tamaño y su forma, como muestran las medidas topográficas, se desprende que los casquetes son predominantemente agua helada, en contraste con el hielo seco, formado por dióxido de carbono; el hielo seco, menos rígido que el agua helada, no podría sustentar la estructura en domo que se observa. Resultó un éxito descubrir que la capa de hielo seco que cubre gran parte del casquete polar meridional se está erosionando a gran velocidad. La erosión no puede continuar indefinidamente. Tampoco las actuales fuentes y sumideros de polvo pueden permanecer por siempre en su estado presente. Para reponer el hielo y el polvo, deben estar ocurriendo otros ciclos, quizá ligados a las variaciones orbitales. Malin y Edgett han sugerido que las condiciones del viento pueden ser ahora menos intensas que en un pasado bastante reciente, lo que constituye un nuevo indicio de que el clima marciano cambia con el tiempo.

Resumen/*La superficie marciana*

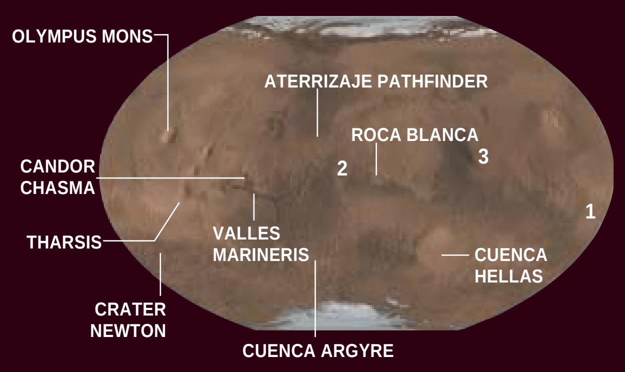
- Las misiones *Mars Global Surveyor* y *Mars Odissey* están suscitando cuestiones de difícil respuesta sobre el planeta rojo. La actuación conjunta de agua, hielo y viento ha esculpido el paisaje, a lo largo de miles de millones de años. Los procesos comparten aspectos de los que operan en la superficie de la Tierra, aunque divergen en otros. No es raro, pues, que la experiencia adquirida en esta última confunda a los que investigan el suelo marciano.
- La cuestión de si Marte fue alguna vez habitable aparece hoy más obscura que nunca. Las sondas espaciales han reunido pruebas en pro y en contra de tal posibilidad. Las misiones preparadas podrían resultar decisivas para dirimir la cuestión.

2. TERRENO ESTRATIFICADO. Aunque de apariencia surrealista y casi como un mapa topográfico, se trata de una imagen real. Cubre el terreno del Candor Chasma occidental, una cañada integrada en el sistema de cañones Valles Marineris. Se han identificado cien estratos diferentes, con un espesor aproximado de diez metros cada uno. Podrían ser rocas sedimentarias depositadas originalmente por agua, antes de la formación del cañón en el terreno. Una posible alternativa es que los estratos fueran polvo depositado por procesos cíclicos atmosféricos. Esta imagen fue tomada por la sonda Mars Global Surveyor.

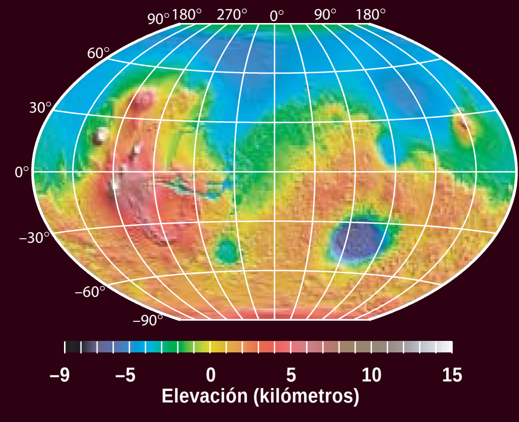
NASA/JPL/SISTEMAS MALIN PARA LA CIENCIA ESPACIAL MOC 2–259


100 METROS

VISTAS GLOBALES DE MARTE

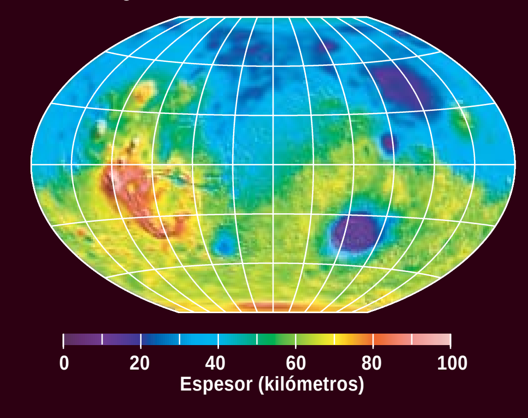


***Lugares de aterrizaje: Crater Gusev* (1), *Meridiani Planum* (2), *Isidis Planitia* (3)**

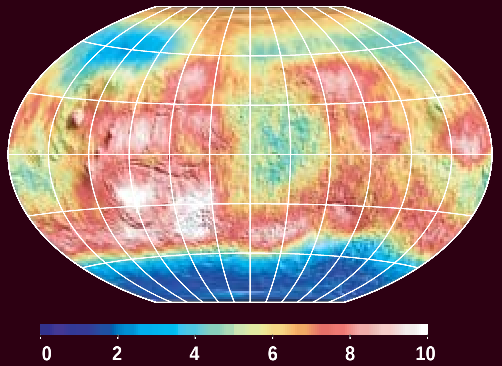


COLOR REAL Marte reúne cuatro mundos: el hemisferio meridional, sembrado de múltiples cráteres (con redes de valles semejantes a ríos), el hemisferio septentrional más llano (con indicaciones de una antigua línea de costa), la región ecuatorial (con volcanes y cañones gigantescos) y los casquetes polares (con un extraño terreno cambiante). Este mapa combina las imágenes de una cámara con gran angular con la altimetría, lo que resalta los detalles. El color es el genuino.

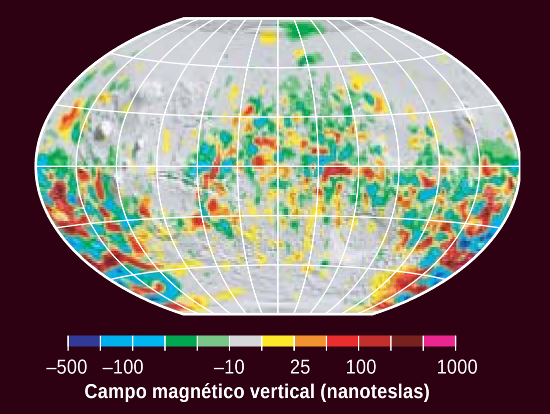
TOPOGRAFIA La elevación abarca 30 kilómetros desde las cuencas más profundas (*azul oscuro*) hasta los volcanes más empinados (*blanco*). En comparación, el rango de elevación en la Tierra es sólo de 20 kilómetros. El gran círculo azul del hemisferio meridional representa la cuenca de impacto Hellas, uno de los mayores cráteres del sistema solar. En torno a Hellas existe un gran anillo de tierras altas de aproximadamente dos kilómetros de altura.



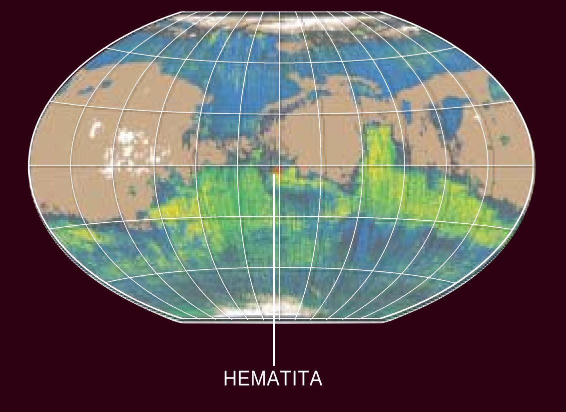
ESPESOR DE LA CORTEZA Mediante la combinación del mapa topográfico con las mediciones de la gravedad de Marte, se deduce el espesor de la corteza marciana, cifrado en 40 kilómetros bajo las llanuras septentrionales y 70 kilómetros bajo las lejanas tierras altas meridionales. La corteza adquiere especial grosor (*rojo*) bajo los gigantescos volcanes de Tharsis, para estrecharse (*morado*) bajo la cuenca de impacto de Hellas.



AGUA Los neutrones revelan la presencia de agua en el primer metro de suelo. La energía de estas partículas, que se producen cuando la radiación cósmica bombardea el suelo, es absorbida por el hidrógeno interno de las moléculas de agua. La pobreza en neutrones de energía media ("epitérmicos") denota un suelo rico en agua (*azul*). La cantidad de agua implicada, la mayoría de ella en el lejano sur, tendría un volumen equivalente al doble del lago Michigan. Puede haber más en el subsuelo más profundo.



MAGNETISMO Marte carece de un campo magnético global, aunque presenta zonas de su corteza magnetizadas con un valor diez veces superior al de la corteza terrestre. En tales zonas, las rocas ricas en hierro se han convertido en barras imanadas, lo que sugiere que Marte tuvo un campo global en la época en que las rocas se solidificaron a partir de su estado líquido. Las bandas de este a oeste se parecen a los patrones producidos en la Tierra por la tectónica de placas, pero se desconoce su origen allí.



GEOLOGIA Las medidas espectrales en el infrarrojo revelan los tipos de rocas. El basalto (*verde*), una roca volcánica primitiva, predomina en el hemisferio meridional. La andesita (*azul*), una roca volcánica más compleja, parece bastante común en el norte. Cerca del ecuador hay un yacimiento de hematita (*rojo*), un mineral producido en presencia de agua. En grandes regiones, el polvo (*marrón*) o las nubes (*blanco*) ocultan los tipos de rocas subyacentes.

EQUIPO CIENTIFICO DEL ALTIMETRO POR LASER DEL MARS ORBITER, SISTEMAS MALIN PARA LA CIENCIA ESPACIAL (*mosaico en color real*); ODED AHARONSON *Instituto de Tecnología de California* (*los demás mosaicos*);
FUENTE: MISION MARS ODYSSEY (*agua*); PHILIP CHRISTENSEN *Universidad estatal de Arizona* (*geología*); MISION MARS GLOBAL SURVEYOR (*los demás mosaicos*)

Una cuarta diferencia importante entre la Tierra y Marte se refiere al comportamiento del agua líquida. En las actuales condiciones de presión y temperatura, ésta es inestable en la superficie. No llueve en Marte, pero el agua helada puede persistir —y lo hace— a cierta profundidad en el interior de su suelo durante gran parte del año, si no el año entero. Lo mismo que en la Tierra, se observan allí diversos tipos de modelos reveladores de un suelo rico en hielo. La sonda *Mars Odissey* ha detectado hielo en el terreno de la mayor parte del planeta fuera de las regiones ecuatoriales; predicen los modelos que el hielo se extiende hasta profundidades considerables.

El agua líquida se filtra. En el año 2000 Malin y Edgett describieron hondonadas recientes que se asemejaban a accidentes esculpidos por el agua en la Tierra. Con la consiguiente excitación, se aventuraron varias hipótesis explicativas: filtración de acuíferos (sorprendentemente encaramados en la cresta de los cráteres), géiseres presurizados de agua, explosiones de alta presión de dióxido de carbono gaseoso y fuentes de calor volcánico en las profundidades.

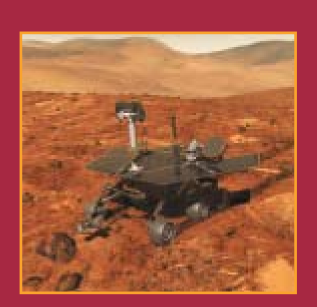
Así las cosas, a principios del año en curso Phillip Christensen, de la Universidad estatal de Arizona, descubrió hondonadas que emergían desde debajo de un banco de nieve y hielo. Las relacionó con los ciclos climáticos marcianos. En los períodos más fríos, las laderas se cubren con una mezcla de nieve y hielo; la luz solar penetra en este manto aislante, calentándolo lo suficiente para que el agua se funda bajo la nieve y fluya por la ladera, creando las hondonadas. En los períodos más cálidos, el manto se funde o evapora, dejando al descubierto las hondonadas.

Dando una vuelta

LOS VEHICULOS TODOTERRENO preparados para aterrizar en Marte merecen una mención especial. Estudiarán la historia geológica del suelo, investigarán el papel desempeñado por el agua y determinarán si las condiciones registradas en el pasado posibilitaron la presencia de vida.

Darán a los científicos una movilidad sin precedentes. Cada vehículo puede avanzar cien metros diarios. Recuérdese que el *Sojourner*, robot de la sonda *Mars Pathfinder* de 1997, recorrió cien metros durante toda la misión [*véase* "La exploración de Marte", por Matthew Golombek; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre 1998]. Un mástil de aproximadamente un metro y medio de altura lleva una cámara binocular y un espectrómetro de emisión térmica, uno de los muchos instrumentos que pueden analizar la composición de materiales. Un brazo robótico presta soporte a los demás instrumentos: un espectrómetro de Mossbauer, un detector de partículas alfa, un espectrómetro de rayos X y un microscopio. El brazo también lleva un raspador de rocas para su estudio. Una antena en forma de plato dirige las señales directamente hacia la Tierra, y una antena de varilla negra envía los datos a través de las sondas orbitales *Mars Global Surveyor* o *Mars Odissey*.

Con los datos suministrados por las sondas orbitales se han podido acotar con precisión los lugares idóneos de aterrizaje. Sopesando el interés geológico (como accidentes que se sospechan que están relacionados con el agua) frente a posibles peligros (como pendientes acusadas y fuertes vientos), entre una lista inicial de más de 150 lugares se seleccionaron siete posibles emplazamientos, que se redujeron a cuatro y, finalmente, a sólo dos: el Cráter Gusev, cuyos depósitos estratificados podrían ser sedimentos del lecho de un lago, y la Meridiani Planum, que posee abundante hematita de grandes granos, un mineral formado en asociación con agua líquida. (La sonda europea *Beagle* 2 aterrizará en Isidis Planitia, una posible depresión sedimentaria).



VEHICULO de exploración de Marte de la NASA.

NASA, REALIZACION ARTISTICA/PROGRAMA MARS EXPLORATION

Capa sobre capa

Pese a la abundancia de agua, Marte es un planeta árido. Tiene la mineralogía propia de una superficie exenta de agua. Sobre la Tierra, la acción del agua líquida caliente produce suelos erosionados ricos en cuarzo, arcillas hidratadas y sales (carbonato y sulfato cálcico). La arena de playa y las dunas de arena son principalmente de cuarzo. En Marte, las sondas no han encontrado todavía ningún depósito de estos minerales. Las dunas marcianas más oscuras son basálticas; constan principalmente de piroxeno y plagioclasa, minerales que en la Tierra se erosionarían muy pronto. De ello se infiere que las actuales condiciones atmosféricas frías y secas han persistido desde hace mucho tiempo en la historia del planeta.

¿Fue siempre Marte tan distinto de la Tierra? Bajo los mantos de polvo y arena se esconden numerosos signos de que el planeta rojo ha venido cambiando en el transcurso del tiempo. De entrada, el planeta muestra una clara divergencia de paisaje entre el hemisferio septentrional y el meridional. El austral, de altitud elevada, se halla salpicado de cráteres (indicio de una superficie antigua). El hemisferio septentrional constituye una vasta llanura de bajo perfil, con menos cráteres (lo que revela menor edad). En medio, se extiende la inmensa meseta de Tharsis, de edad intermedia, coronada por volcanes que dejan pequeños a cualquiera de la Tierra. Apoyado en nuevos datos de alta resolución de estos volcanes, James W. Head III, de la Universidad de Brown, ha descubierto patrones de flujo que recuerdan a los glaciares de montaña; sugieren la presencia de hielo bajo un manto de roca y hielo.

La insólita planicie de las tierras bajas septentrionales induce a suponer que nos hallamos ante lo que fue un lecho de lagos durante un período importante de la historia marciana. Por lo que se aprecia, se cubren con múltiples capas de flujos volcánicos y restos sedimentarios que se originaron en el sur. Nuevos mapas to-

pográficos detallados han desvelado “cráteres ocultos”: sutiles expresiones circulares, parte evidente de una antigua superficie con forma de cráter que ha quedado sepultada por una fina capa de depósitos recientes.

A lo largo del borde de las tierras altas meridionales se suceden accidentes que sólo el agua líquida podría haber esculpido. Alcanzan un tamaño mucho mayor que sus homólogos terrestres. El cañón Valles Marineris abarcaría desde Los Angeles hasta Nueva York. Ningún cañón terrestre puede parangonárselo ni en longitud, ni en anchura, ni en profundidad. En su cima, el terreno está mezclado, lo que indica que el agua no discurrió en arroyos estables sino por torrentes concentrados y catastróficos, que arrastraron la superficie a su paso. Otros canales marcianos formados por torrentes tienen características similares. Puesto que estos accidentes pertenecen a la meseta de Tharsis, tendrán una edad intermedia.

Las islas de perfil determinado y otros accidentes existentes en estos canales ofrecen un estrecho parecido con los terrenos roturados del noroeste de los Estados Unidos, que fueron erosionados por la Inundación de Spokane hacia el final de la última glaciación, hace aproximadamente diez mil años. Durante el gigantesco diluvio, un lago de gran tamaño reventó su dique de hielo y se vació en pocos días. En Marte calamidades de ese tenor resultaron de diez a cien veces más devastadoras. Las pudieron desencadenar fuentes de calor volcánicas o el flujo general de calor procedente del interior del planeta. El calor podría haber fundido el hielo por debajo de la espesa capa de permafrost, elevando la presión hasta que la masa de agua engendrada terminó por reventar.

De todos los accidentes relacionados con el agua, los más controvertidos son las redes de valles. Situadas a lo largo de las tierras altas del sur, presentan una configuración dendrítica, ramificada, que recuerda a los ríos terrestres; se formarían, pues, por escorrentía superficial de agua de lluvia o nieve. Constituyen la prueba más evidente de que Marte fue en otro tiempo tan cálido como la Tierra. Pero tales redes difieren un tanto de los ríos terrestres alimentados por lluvias. Se parecen más a las redes fluviales de zonas desérticas, que están alimentadas por agua que se filtra lentamente desde fuentes subterráneas. Estas corrientes acostumbran originarse en anfiteatros de paredes abruptas; no proceden de afluentes cada vez menores. En los con-

El autor

ARDEN L. ALBEE dirige los proyectos científicos de la misión *Mars Global Surveyor*. Profesor emérito de geología y ciencia planetaria del Instituto de Tecnología de California, estuvo al frente del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA desde 1978 hasta 1984.

El estudio continuo de Marte

MARS GLOBAL SURVEYOR y *Mars Odissey* giran alrededor del planeta en trayectorias que las llevan por encima de ambos polos. Sus órbitas permanecen fijas mientras Marte gira debajo de ellas, lo que permite que los instrumentos observen zonas específicas de día y noche en todo el planeta. Merced a ese continuo seguimiento pueden rastrear cambios en la superficie, la atmósfera, la gravedad y el campo magnético.

La sonda *Mars Global Surveyor* porta cinco instrumentos principales. Su altímetro láser ha medido la morfología y topografía de Marte con una precisión de altitud de aproximadamente cinco metros, lo que significa que ahora se dispone de mejores mapas de Marte que de la mayor parte de la Tierra. La cámara toma imágenes de la superficie en rojo y azul con una resolución media, así como imágenes de alta resolución —1,4 metros por píxel, de zonas acotadas; es decir, con la perfección de las fotografías obtenidas por los satélites espías de los años sesenta. Un interferómetro de Michelson mide el espectro térmico infrarrojo emitido con alta resolución espectral pero baja resolución espacial, procedimiento adecuado para representar la composición mineral y las propiedades térmicas de la superficie. Con un magnetómetro se determina el campo magnético. La propia sonda espacial puede considerarse un instrumento más: su movimiento es sensible a las variaciones de la gravedad marciana. El campo gravitatorio revela el espesor de la corteza y los cambios en el tamaño de los casquetes polares de hielo.

La sonda *Odissey* complementa las prestaciones de la *Global Surveyor.* Aunque su cámara carece de un modo de alta resolución, toma imágenes en cinco bandas de color seleccionadas. Su instrumento de formación de imágenes infrarrojas tiene baja resolución espectral pero alta resolución espacial. Otro instrumento mide los flujos de neutrones y rayos gamma, que son sensibles al hidrógeno existente justo debajo de la superficie del planeta. Por consiguiente, *Odissey* constituye la primera sonda espacial capaz de investigar bajo la superficie de Marte hasta una profundidad de aproximadamente un metro.

Estas sondas espaciales controlan, asimismo, la atmósfera con cámaras que barren todo el planeta, en un procedimiento análogo al de los satélites meteorológicos que giran en torno a la Tierra. Doce veces al día el espectrómetro de emisión térmica toma una lectura de temperatura, presión, nubosidad y concentración de polvo. Además, como las radiotransmisiones se difractan al atravesar la atmósfera de Marte, el tratamiento de la señal puede inferir la variación de la temperatura y la presión con la altitud.



MARS GLOBAL SURVEYOR (realización artística)

NASA, REALIZACION ARTISTICA/PROGRAMA GLOBAL SURVEYOR

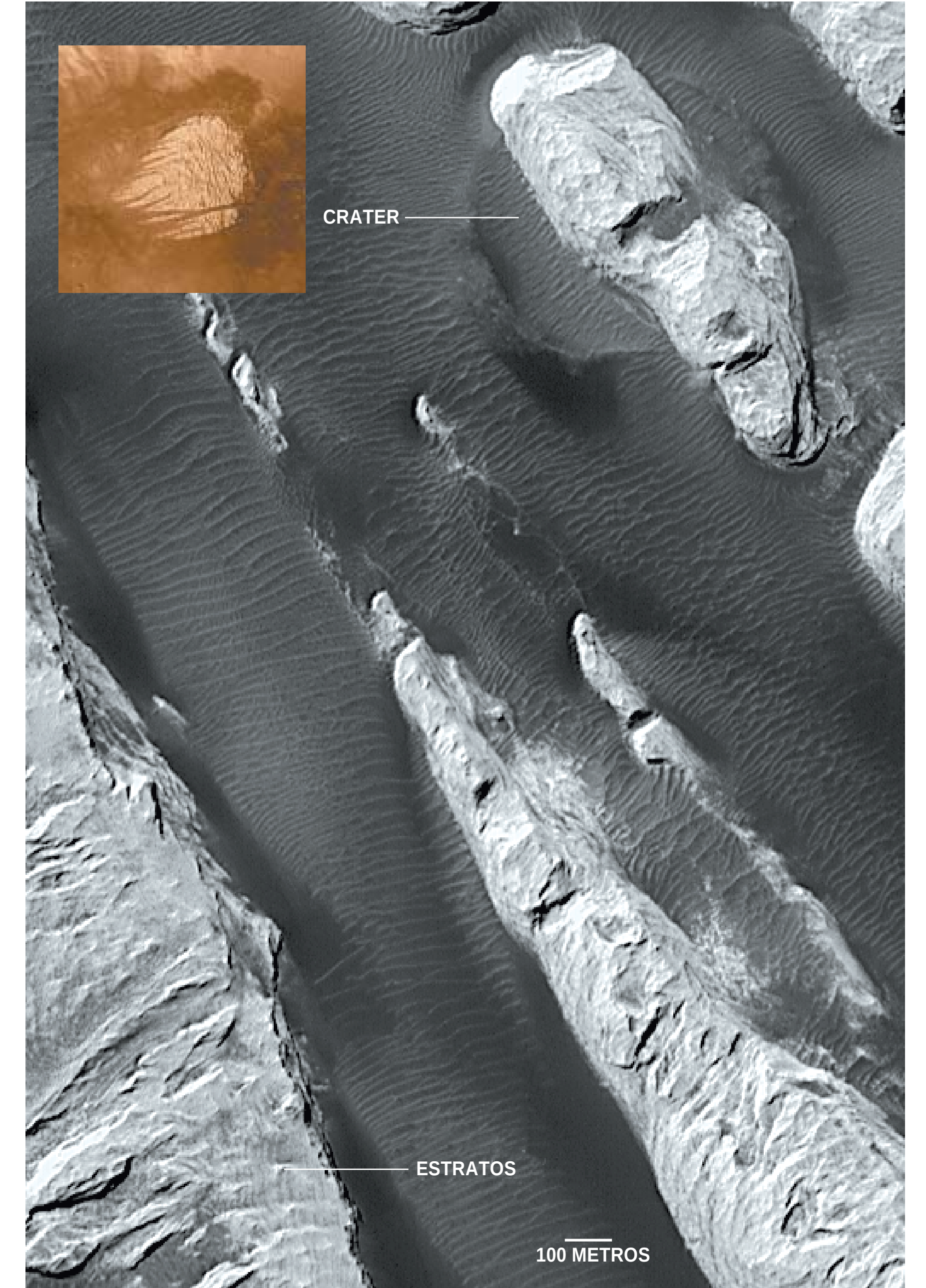
3. EN LAS LLANURAS al noroeste del Olympus Mons, remolinos de polvo barren el terreno y van dejando bandas a su paso (*derecha*). Se han desarrollado procesos similares en la cuenca Argyre (*debajo*) y al este de Valles Marineris (*más abajo*), donde se captó un remolino en acción. Estos vórtices semejantes a los tornados —que se cree que se forman cuando el aire caliente asciende desde la superficie— retiran el polvo de color claro y dejan expuesto un suelo más oscuro. Se trata de uno de los muchos procesos relacionados con el viento que continuamente están reformando la superficie marciana. La imagen de la derecha la obtuvo la sonda *Mars Odissey*; las dos inferiores, la sonda *Mars Global Surveyor*.





1 KILOMETRO

NASA/*Universidad estatal de Arizona* EQUIPO CIENTIFICO DE THEMIS, 6 DE FEBRERO, 2003 (*derecha*); NASA/JPL/SISTEMAS MALIN PARA LA CIENCIA ESPACIAL MOC 2–220 (*arriba a la izquierda*) Y MOC 2–318 (*abajo a la izquierda*)



4. LA "ROCA BLANCA", vista por la sonda espacial *Viking* en los años setenta (*recuadro*), constituye un ejemplo fehaciente de lo engañoso que puede ser el supuesto parecido de Marte con la Tierra. El accidente induce a pensar en un montón de sal depositado por agua líquida; pero los registros espectrales nos descubren que corresponde a polvo, compactado o consolidado. El polvo rojizo ocultó los accidentes presentes, como el cráter en la zona superior derecha, y fue a su vez sepultado por arena negra. La imagen, tomada por la sonda *Mars Global Surveyor*, atestigua una secuencia misteriosamente compleja de episodios geológicos.

NASA/JPL/SISTEMAS MALIN PARA LA CIENCIA ESPACIAL MOC 2–264; CALVIN J. HAMILTON (*inserto*)

gresos científicos se vuelve siempre sobre una cuestión crucial: ¿Llovía en el primitivo Marte?

La secuencia temporal de las redes hidrológicas podría dar la clave de su naturaleza. La investigación reciente del borde septentrional de las tierras altas revela que, durante el intenso bombardeo de meteoritos acaecido al principio de la historia marciana, y no después, se erosionaron cantidades inmensas de material. De acuerdo con dicha inquisición, la distribución de agua estuvo cambiando mientras los impactos transformaban el paisaje. Los cráteres se llenaron con agua y restos geológicos; los canales comenzaron a enlazarse para crear una red fluvial, pero los impactos interrumpían continuamente este proceso. A modo de botón de muestra, la Cuenca Argyre, de mil kilómetros de diámetro, pudo haber estado llena de agua hasta su borde superior. Forma parte de un sistema de valles que trajo agua desde cerca del polo sur, a través de la cuenca de canales que cruzaban el ecuador. La intervención respectiva del agua y el hielo en estos sistemas, lo mismo en superficie que en el subsuelo, permanece sin aclarar. En cualquier caso, estas redes son muy diferentes de los sistemas hidrológicos de la Tierra.

Para desentrañar la historia marciana, contamos con una nueva pista. Se trata de una de las mayores sorpresas proporcionadas por la sonda *Mars Global Surveyor*: el grado de depósitos estratificados que conforman la corteza superior. El subsuelo está casi siempre estratificado allí donde queda al descubierto; es decir, en las paredes de los cañones, cráteres, mesas y valles. Los estratos divergen unos de otros en espesor, color e intensidad. Muestran que la superficie marciana ha sufrido complejas secuencias de deposición, formación de cráteres y erosión. Los estratos más antiguos ocupan la mayor extensión, en tanto que los superiores han sufrido una eliminación parcial, a causa, se supone, de la acción erosiva del viento.

¿De dónde procedían los estratos? La ausencia de bloques con forma de cantos rodados descarta que los originaran flujos volcánicos, pero no la ceniza volcánica. En última instancia, sin embargo, la mayoría de los estratos se crearían con restos de impactos. En la superficie lunar, se han observado anillos superpuestos de restos de impactos, que señalan cráteres de edades diferentes. De modo similar, se han formado tantos cráteres en Marte, que la corteza superior quedó "labrada"; más tarde, el agua y el viento dispersaron el material removido.

Marte, ¿un planeta azul?

En cierto sentido, nuestro conocimiento sobre el Marte primitivo se encuentra más confuso que nunca. Tal obscuridad se pone de manifiesto al abordar el agua líquida. La presencia, o la ausencia, de agua líquida resulta fundamental para los procesos

geológicos, los cambios climáticos y el origen de la vida. Las redes primitivas de valles y los posteriores canales de inundación nos hablan de agua en abundancia. Las pruebas de primitivas precipitaciones de lluvia atestiguan una atmósfera mucho más densa en el pasado. Pero las sondas espaciales no han encontrado señales de depósitos de minerales carbonatados, que serían los vestigios esperados de una densa atmósfera primitiva con dióxido de carbono [véase “El clima de Marte”, por Robert M. Haberle; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 1986].

Llegados aquí, se han presentado tres hipótesis principales. De acuerdo con la primera, podría en efecto haber habido una atmósfera primitiva potente. El planeta podría haber tenido lagos, océanos incluso, libres de hielo. Robert A. Craddock, del Museo Nacional del Aire y del Espacio, y Alan D. Howard, de la Universidad de Virginia, han sugerido que el dióxido de carbono se escapó hacia el espacio o se fijó en minerales carbonatados, no detectados todavía. Curiosamente los espectros de la sonda *Mars Odissey* han revelado pequeñas cantidades de carbonatos en el polvo.

Cabría, por el contrario, que Marte haya tenido una atmósfera bastante tenue y haya sido un mundo invernal. Cualquier masa de agua emergida se habría hallado cubierta de hielo. Podría haber caído nieve, reponiendo el agua subterránea y produciendo arroyos temporales de agua en la superficie. Entre otros, Steven M. Clifford, del Instituto Lunar y Planetario de Houston, ha lanzado la conjetura de que la fusión bajo un glaciar o una espesa capa de permafrost podría haber rellenado las fuentes subterráneas de agua. Aunque Marte hubiera sido de un frío glacial, la ocurrencia de olas periódicas de temperaturas relativamente cálidas podría haber reactivado el planeta. Los desplazamientos orbitales, similares a los que activan las glaciaciones en la Tierra, impulsarían estos ciclos climáticos. Head, John F. Mustard, de la Universidad de Brown, y otros han apuntado a la dependencia de la latitud del hielo y al cubrimiento de polvo como pruebas del cambio climático.

Vayamos con la tercera hipótesis. Quizá los ciclos climáticos resultaron insuficientes para hacer que la temperatura permitiera mantener extensiones de agua líquida. El planeta gozaría de condiciones suaves sólo durante breves períodos después de grandes impactos. Cada uno de estos impactos depositaba materiales ricos en agua y bombeaba suficiente calor y agua hacia la atmósfera para provocar la lluvia. Aunque pronto el planeta volvía a su habitual estado de congelación. Victor Baker, de la Universidad de Arizona, ha manifestado que el intenso volcanismo en la región de Tharsis hizo que el primitivo Marte fuese periódicamente un lugar bastante templado.

No debe descartarse que ninguna de esas opciones sea correcta. No conocemos todavía lo suficiente sobre el primitivo Marte como para establecer el clima reinante. Debemos esperar a futuras exploraciones. A diferencia de la Tierra, Marte ha conservado gran parte de su antiguo paisaje, lo que puede ofrecer pistas sobre las condiciones bajo las cuales se formó. El día que conozcamos los mecanismos que convirtieron a Marte en un planeta tan distinto del nuestro, habrá llegado el momento de ahondar en la historia oculta de la Tierra. Con las nuevas misiones de sondas exploradoras habrán de venir las claves decisivas.

Bibliografía complementaria

MARS 2000. Arden L. Albee en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 28, páginas 281-304; 2000.

MARS: THE LURE OF THE RED PLANET. William Sheehan y Stephen James O’Meara. Prometheus Books, 2001.

THE MARS GLOBAL SURVEYOR MARS ORBITER CAMERA: INTERPLANETARY CRUISE THROUGH PRIMARY MISSION. Michael C. Malin y Kenneth S. Edgett en *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, n.º E10, págs. 23.429-23.570; 25 de octubre, 2001.

NATURE INSIGHT: MARS. Sección especial en *Nature*, vol. 412, págs. 207-253; 12 de julio, 2001.

La enfermedad consuntiva crónica

Emparentada con la enfermedad de las vacas locas, la enfermedad consuntiva crónica se está extendiendo entre los ciervos salvajes de los Estados Unidos. Si no se la contiene, este flagelo, de pronóstico letal, podría amenazar el ganado e incluso transmitirse al hombre

Philip Yam

1. LOS CIERVOS DE VIRGINIA o venados de cola blanca (*Odocoileus virginianus*) fueron cazados de forma intensiva en la zona de erradicación de Wisconsin. Este ciervo, que se libró de ser sacrificado por vivir en una granja de animales salvajes, se halla sometido a una cuarentena indefinida.

Aunos 60 kilómetros al oeste de Madison, capital del estado Wisconsin, se ha establecido una zona de erradicación. Abarca algo más de 1000 kilómetros cuadrados. Allí viven miles de ciervos de Virginia o venados de cola blanca (*Odocoileus virginianus*); por decirlo con mayor propiedad, vivían. El año pasado, el Departamento de Recursos Naturales de Wisconsin abrió períodos especiales de caza con el fin de abatir más de 18.000 ciervos. Durante el otoño, los ciervos muertos se transportaban a las zonas de registro, donde empleados del estado embutidos en indumentaria y guantes de protección arrastraban los cadáveres desde los camiones de reparto para depositarlos sobre mesas campestres, cubiertas de plástico. Con sierras eléctricas cortaban las cabezas, las envolvían en bolsas dobles y las enviaban para su análisis. Los cuerpos decapitados se incineraban.

Con la masacre de Wisconsin, estado famoso por su ganadería, se intenta evitar que la enfermedad consuntiva crónica (ECC), una patología de pronóstico letal, infecte a los otros 1,6 millones de cérvidos del estado. Los análisis permiten a la administración aquilatar el alcance de la epidemia (que se acerca al 1,6 por ciento) y determinar si la entresaca frena su expansión. No existe ninguna prueba *in vivo* que nos faculte para comprobar si un animal de apariencia saludable está, en realidad, incubando la enfermedad; sólo sirve una muestra de tejido cerebral.

La enfermedad resulta de la acción de un agente patógeno, que acribilla literalmente el tejido y lo deja perforado con multitud de agujeros microscópicos; se forman placas amiloides, que arruinan el órgano. Confinado durante mucho tiempo a los aledaños de las Montañas Rocosas, el mal ha hecho ya acto de presencia en 12 estados de la Unión y en dos provincias del Canadá. La enfermedad pasa fácilmente de un ciervo a otro, sin que ninguno parezca oponer resistencia natural. Michael W. Miller, de la División de Vida Salvaje de Colorado, cree que persistirá endémica.

Preocupa, en particular, la naturaleza de la ECC. Pertenece a la misma familia que un flagelo mejor conocido, la encefalopatía espongiforme bovina (EEB), o enfermedad de las vacas locas. Difundida por piensos de base animal que contenían tejidos de vacas y ovejas enfermas, la EEB apareció en Inglaterra en los años ochenta y continúa infestando ese país a un nivel bajo. (En otra veintena de países se han registrado también casos.) En 1996, se comprobó que la EEB podía transmitirse a los seres humanos a través de la ingesta de carne infectada, produciéndoles una condición fatal: la variante de la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob (vECJ, distinta de la esporádica ECJ, más común, que surge espontánea en una persona de cada millón). Se investiga ahora si la ECC puede infectar al hombre y al ganado doméstico.

Proteína patológica

El agente infeccioso común a todas estas enfermedades es el prion, término que acuñó en 1982 Stanley B. Prusiner, de la Universidad de California en San Francisco. El prion es una proteína que existe en todos los animales, aunque la secuencia exacta de aminoácidos depende de la especie. Adopta una forma de dos posibles. Plegada correctamente, se trata de la proteína priónica normal (PPr), que abunda en las células del cerebro y ayuda a procesar el cobre. Plegada de manera incorrecta, la proteína priónica se convierte en una entidad patógena que mata. La proteína malformada tiene una capacidad particular: repliega copias de la PPr a su propia imagen, con lo que fabrica más de sí misma.

En un principio, la teoría de los priones de Prusiner se recibió con escepticismo. Que un agente patógeno pudiera replicarse y transmitir sus rasgos sin la intervención de ácidos nucleicos (ADN o ARN) violaba la ortodoxia de la biología molecular. Pero se han acumulado pruebas suficientes para confirmar que algunas proteínas pueden efectivamente copiarse y que las variantes de la PPr son actores esenciales en las encefalopatías espongiformes.

El que los priones carezcan de ADN o ARN constituye, además, la razón fundamental de su resistencia característica. La radiación germicida, los cebos de formaldehído y el agua hirviente alteran inmediatamente los ácidos nucleicos bacterianos y víricos, pero dichos tratamientos apenas afectan a los priones malformados. Se han expuesto tejidos contaminados con priones a una fuente de calor seco de 600 grados Celsius y se los ha dejado enterrados durante tres años; transcurrido ese período, el material, aunque muy debilitado, seguía siendo infeccioso. Se sabe de casos de médicos que, de forma involuntaria, han transmitido enfermedades infecciosas a pacientes por medio de instrumentos quirúrgicos y órganos trasplantados que habían pasado por los procedimientos de esterilización habituales. (La desinfección de priones requiere el caldeamiento prolongado o el uso de sustancias químicas corrosivas, como el hidróxido sódico.)

Establecida en las Colinas

La tenacidad de los priones mal plegados parece ser una de las razones fundamentales por las que la enfermedad consuntiva crónica ha persistido y se ha extendido desde su presumible punto de inicio, cerca de Fort Collins. Allí, en 1967, en el Centro de Investigación de Vida Salvaje de las Colinas, se documentó el primer episodio de ECC en ciervos mulo (*Odocoileus hemionus*) cautivos; se mantenían en el

DAVID NEVALA

centro para estudios de nutrición (el ciervo mulo es el cérvido más común en el oeste norteamericano). Tal como sugiere el nombre de la enfermedad, los ciervos afectados pierden peso en semanas o meses. Se tornan sedientos, lo que les lleva a beber grandes cantidades de agua y, en consecuencia, a orinar mucho. Babean. Se retraen del grupo, se vuelven apáticos y agachan el testuz. A los tres o cuatro meses de manifestarse los síntomas, mueren; aunque hay casos extremos de muerte a los pocos días o al cabo del año. El período de incubación, durante el cual los animales no muestran ningún síntoma, se extiende entre unos 20 y unos 30 meses.

El centro de Fort Collins se convirtió en una trampa mortal de ECC. Entre 1970 y 1981, el 90 por ciento de los ciervos que pasaron allí más de dos años sucumbieron o hubo que sacrificarlos. En 1980, el azote apareció fuera de Colorado, 200 kilómetros al noroeste de Fort Collins: exactamente en la Unidad de Investigación de Sybille, al sudeste de Wyoming. Los dos centros habían intercambiado venados con fines de reproducción; se trataba, pues, de una enfermedad infecciosa, incluso para una especie distinta. En efecto, muy pronto los uapitíes (*Cervus elaphus canadensis*, una subespecie del ciervo común europeo) de estos centros contrajeron la enfermedad. (Venados y ciervos pertenecen a la familia Cérvidos.)

Durante años, se atribuyó la ECC a un déficit nutricional, envenenamiento o estrés provocado por la reclusión. Pero en 1977 Elizabeth S. Williams, de la Universidad estatal de Colorado, descubrió cuán errónea era esa idea. En el transcurso de la preparación del doctorado, analizaba cortes cerebrales procedentes de animales infectados. Así descubrió los múltiples agujeros microscópicos característicos. Unos agujeros que en seguida asoció a los producidos por la tembladera, enfermedad de los ovinos que fue la primera encefalopatía espongiforme documentada.

De hecho, parece que la ECC se originó a partir de la tembladera. Richard E. Race, de los Laboratorios de las Montañas Rocosas de Hamilton (ente adscrito a los Institutos Nacionales de la Salud), investigó y no halló distinción entre las PPr de corderos con tembladera y de cérvidos con ECC. Se produjo otro hallazgo coherente con el resultado anterior: Amir Hamir, del Centro Nacional de Enfermedades Animales del Departamento de Agricultura de los EE.UU., en Ames, no encontró diferencia morfológica entre muestras de cerebro de uapitíes con ECC y los cortes correspondientes de uapitíes infectados experimentalmente con tembladera. (Probablemente, la EEB derivó también de la tembladera, tras la ingestión, por bóvidos, de piensos procedentes de corderos infectados.)

A diferencia de la EEB en las vacas (o de la vECJ en los humanos), los cérvidos, sin embargo, no enfermaban por la ingesta. La ECC se comporta a la manera de la tembladera en el sentido de que se propaga entre los individuos, sin que nadie sepa a través de qué mecanismo. Los priones podrían acechar en la orina. Durante la estación de la brama, los machos lamen la orina de decenas de ciervas para descubrir cuáles están en celo. Las hembras de uapitíes lamen a los machos que se han rociado con orina. La saliva podría constituir, asimismo, un vector; tanto en los venados como en el uapití, los individuos se buscan y acarician lamiéndose unos a otros boca y nariz, con el intercambio consiguiente de babas. Los uapitíes mantenidos en granjas pueden intercambiar babas cuando coinciden en comederos comunes. También es posible que los animales adquieran el agente patógeno mientras pastan en áreas donde los enfermos han dejado priones en el suelo en sus heces, orina y saliva.

En 1985 los veterinarios descubrieron la ECC en venados y uapitíes en libertad, a menos de 50 kilómetros de distancia, por lo común, de los dos centros de vida salvaje. No se sabe si la enfermedad se originó en la naturaleza y se extendió a los animales cautivos, o si siguió el camino inverso. Las dos poblaciones habían tenido mucho tiempo para mezclarse. En especial durante la estación de la brama, los cérvidos salvajes olfateaban a los cautivos a través de las cercas. También hubo ciervos incubadores de la enfermedad que pudieron haber escapado o se soltaron.

Ambos centros pusieron todo su empeño en erradicar la ECC. El de Sybille sacrificó a todos los venados y uapitíes del área afectada. Aunque esperó un año para introducir nuevos animales, cuatro años más tarde venados y uapitíes volvían a caer víctimas de la ECC. El centro de Fort Collins actuó de manera más agresiva. Se sacrificaron todos los ciervos y uapitíes residentes. Se excavaron varios centímetros de suelo y se rociaron repetidamente edificios y pastos con cloro para piscinas, que elimina bacterias y virus. Después de esperar un año, reintrodujeron 12 terneros de uapití, pero pocos años después dos de estos animales contrajeron la ECC.

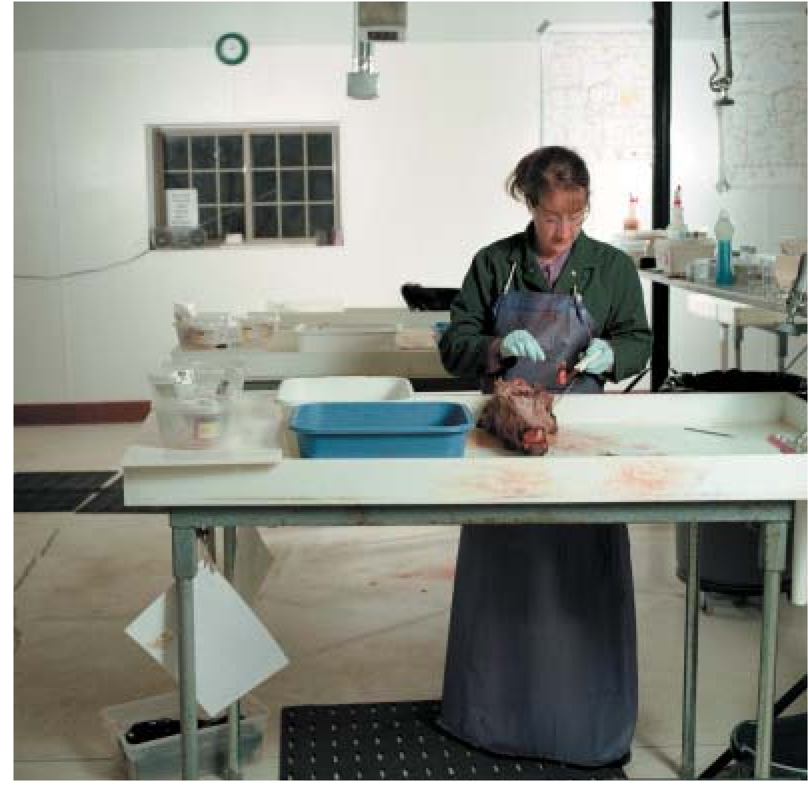
La persistencia de la enfermedad ha dejado contaminada, de forma permanente, un área de unos 40.000 kilómetros cuadrados en el nordeste de Colorado, sudeste de Wyoming y (a partir de 2001) sudoeste de Nebraska. La incidencia de la ECC entre los cérvidos de esa zona endémica es, por término medio,

Resumen/*Enfermedad consuntiva crónica*

- La enfermedad consuntiva crónica (ECC) es una condición fatal que se propaga entre los ciervos salvajes de algunas partes de Norteamérica. Produce multitud de agujeros microscópicos en el tejido cerebral, causa en parte de su muerte.
- Los priones, proteínas con un plegamiento erróneo, desencadenan la enfermedad. La extrema tenacidad de los priones y los largos períodos de incubación de la ECC dificultan el control de la expansión de la enfermedad.
- Se están realizando estudios para ver si la ECC puede infectar a los seres humanos y al ganado.







2. LA ENFERMEDAD CONSUNTIVA CRONICA endurece la piel de un uapití infectado, que muestra asimismo síntomas tempranos de desmejora general (*arriba izquierda*). La enfermedad, que ha aparecido en 14 estados y provincias (*mapa*), acribilla de agujeros el tejido cerebral (*áreas blancas en la micrografía*). En un laboratorio provisional instalado cerca de Black Earth, Wisconsin (*arriba*), un investigador extrae muestras de tejido de la cabeza de un venado de cola blanca sacrificado en la zona de erradicación del estado.

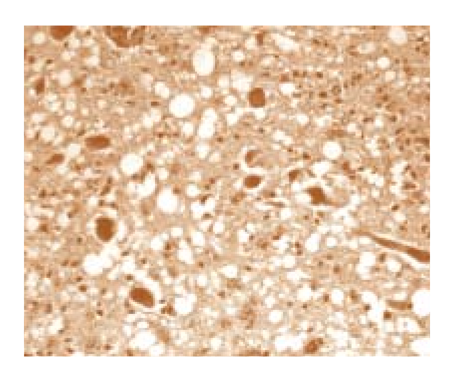


de entre el 4 y el 5 por ciento; en algunos lugares, alcanza, sin embargo, el 18 por ciento. Para conseguir que la enfermedad quede confinada allí, los centros de investigación cortaron todo intercambio de ejemplares. De hecho, no hay ningún cérvido cautivo que abandone vivo el área endémica. Se contaba con un buen aliado, las montañas y otras barreras naturales, para frenar la expansión de la ECC más allá de la zona endémica. Pero había una manera fácil de sortear tales obstáculos: por la carretera y en camión.

Fuera y alrededor

Distribuidos por Estados Unidos y Canadá, hay unos 11.000 granjas y ranchos de animales salvajes, que mantienen cientos de miles de venados y uapitíes. Además de explotar su carne, los rancheros comercian con las astas; las del uapití se venden como un suplemento vitamínico en las tiendas de productos naturales ("astas de terciopelo") y como afrodisíaco en Asia ("Viagra de terciopelo"). Cuando se quiere establecer una explotación de ese tipo, hay que empezar por comprar ciervos reproductores. En algún punto de la cadena, el sector debió incorporar animales incubadores del área endémica. Y el comercio de cérvidos entre los diversos estados de la Unión continuó su dispersión, hacia el oeste a través de la Divisoria Continental, y hacia el este a través del río Mississippi. (En la actualidad, la mayoría de los estados regulan dicho comercio.)

El primer ciervo de granja que mostró síntomas de ECC fue un uapití; ocurrió en 1996, en un rancho de Saskatchewan. Un lustro más tarde, eran ya una veintena las explotaciones afectadas, en los estados de Colorado, Kansas, Montana, Nebraska, Oklahoma y Dakota del Sur, así como en la provincia canadiense de Alberta. Medidas rápidas y agresivas (es decir, el sacrificio



de los rebaños) parece que eliminaron los problemas en los ranchos.

No obstante, el transporte de cérvidos incubadores pudo haber difundido la ECC a las poblaciones salvajes de los estados mencionados y más allá de sus lindes, por ejemplo a los venados de cola blanca de la zona de erradicación de Wisconsin. Pero se desconocen el momento y la forma precisos en que los ciervos mulo la transmitieron a los ciervos de Virginia, que es la especie más común en los Estados Unidos orientales. Quizá nunca se

3. CADAVERES DE CIERVOS correspondientes a las batidas de caza de 2003 en la zona de erradicación de Wisconsin, que fueron almacenados en una unidad refrigerada. Las cabezas se enviaron para su estudio por si presentaban ECC; los cuerpos fueron incinerados.



aclare este extremo. Sobre la base de modelos epidemiológicos y del porcentaje de incidencia en la zona de erradicación de Wisconsin, que es de aproximadamente 1,6, se supone que la ECC ha estado acechando allí desde los primeros años noventa.

El enfoque adoptado en Wisconsin parece adecuado en el marco del proceder de las enfermedades priónicas. Se trata de encontrar un foco, restringido en lo posible, y desembarazarse de todos los animales de la zona, con la esperanza de evitar que la ECC consiga instalarse de manera firme en la región. En Wisconsin es posible una expansión rápida, dada la densidad de la población de ciervos en el extremo sudoccidental del estado. Thomas Givnish, experto en la ecología de enfermedades de la Universidad de Wisconsin en Madison, señala que hay de 20 a 40 ciervos por kilómetro cuadrado, es decir, 10 veces la densidad del área endémica que rodea a Fort Collins. A finales de marzo, los cazadores de Wisconsin habían cobrado 9287 ciervos, lo que reducirá un 25 por ciento la población de otoño pero no eliminará la ECC, advierte Tom Howard, un biólogo de vida salvaje del estado. Puede que sean necesarias unas cuantas temporadas más de caza libre.

Si se considera la persistencia de los priones, quizá Wisconsin, lo mismo que Colorado, se vea obligada a convivir con la ECC. Se confiaba, en Colorado, en deshacerse de la enfermedad mediante entresaca. Pero se llegó demasiado tarde: había pasado a la población natural. Igual suerte desgraciada pueden haber corrido otros estados que han encontrado ECC entre los ciervos salvajes, como Illinois y Nuevo México.

¿En el hombre?

Se ignora si la ECC puede transmitirse a las personas. En un ensayo de laboratorio se mezclaron priones de ECC con proteínas priónicas normales de cérvidos, humanos, ovejas y vacas. Los priones de ECC tuvieron muchas dificultades en convertir las PPr humanas normales: se cambió menos del 7 por ciento de la proteína. Pero ésa no

es toda la verdad: pese a su parquedad, lo lograron con una eficacia similar a la que lo hacen los priones de la EEB. Y, puesto que la EEB ha infectado al hombre, la ECC puede suponer un riesgo parecido. Sin embargo, al ser la carne de bóvido más popular que la de caza, la ECC no plantea exactamente la misma amenaza para la salud pública.

Dada la importancia de una infección de EEC en humanos, tomó cartas en el asunto el Centro para el Control y Prevención de Enfermedades (CDC). Investigó las muertes de tres jóvenes acostumbrados a comer carne de caza que sucumbieron a la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob esporádica. Todos tenían menos de 30 años, lo que es extremadamente raro en la ECJ. De hecho, hasta el 31 de mayo de 2000, sólo se dio otro único caso en este grupo de edad desde que se inició la vigilancia en 1979.

El primer caso correspondía a una joven cajera de 28 años, fallecida en 1997. De niña había comido venado y uapití, que su padre cazaba en Maine. El segundo era de un joven de Utah, un vendedor de 30 años que había cazado de forma regular desde 1985 y que murió en 1999. La tercera víctima estudiada era un camionero de Oklahoma, de 27 años de edad, fallecido en 2000; había cazado y comido venado al menos una vez al año. Las pruebas realizadas en los 1037 cérvidos abatidos durante la temporada de caza de 1999 en las regiones de donde provenía la carne consumida por las víctimas, dieron todas resultado negativo para la ECJ (la carne no procedía del área endémica). El cerebro de las víctimas no presentaba lesiones únicas o señales bioquímicas distintivas, a diferencia de lo que suele ocurrir en otras enfermedades priónicas en humanos.

Otros seis pacientes (todos ellos de edad mediana) hicieron levantar sospechas sobre el riesgo de la ECC para la población humana. Tres eran varones del Medio Oeste, que vivían al aire libre y habían participado en festines de ciervos y venados salvajes; murieron en la década de 1990. Los demás casos, del año en curso, incluyen dos personas del estado de Washington que cazaban juntas. Sin embargo, los investigadores no pudieron encontrar conexión alguna con la ECC. Además, los estados de la Unión que padecen la ECC no han descubierto una incidencia mayor de la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob.

Aunque tranquilizadores, tales resultados no permiten extraer la conclusión de que la enfermedad consuntiva crónica no suponga un riesgo para la salud humana. El período de incubación de las enfermedades priónicas puede extenderse hasta 40 años, y la ECC se ha venido expandiendo de manera reconocida sólo en los 10 últimos. La rareza de las enfermedades priónicas y el bajo consumo de cérvidos en los Estados Unidos (en comparación con la carne de buey) nos obliga a ser cautos. Ante las dudas que rodean a la ECC y habida cuenta de que las enfermedades priónicas de los animales han saltado a los seres humanos, el CDC advierte contra el consumo de carne de cualquier animal con señales de una encefalopatía espongiforme.

Se investiga también si la ECC entraña una amenaza para los animales domésticos. En un experimento iniciado en 1997, todavía en curso, se inyectaron suspensiones cerebrales de ciervo mulo con ECC en el cerebro de 13 terneros de la raza Angus. Dos enfermaron a los dos años de la inoculación, otros tres cerca de cinco años después. Hamir, director del ensayo, empezó a repetir el experimento en noviembre de 2002, esta vez con el cerebro de ciervos de Virginia con ECC.

En condiciones más naturales, los bovinos no han contraído la ECC. Williams ha mantenido juntos vacas y cérvidos infectados y, después de más de cinco años, las vacas siguen sanas. Los bóvidos que se han desenvuelto junto a cadáveres en descomposición de animales que tenían ECC, o encerrados en rediles que anteriormente habían albergado a animales con ECC, no han contraído la enfermedad priónica. (Unas informaciones que aportan tranquilidad para el ganado vacuno que pasta en la naturaleza, donde a veces puede coincidir con ciervos salvajes.) Para ver si la ECC podría suponer un riesgo por vía de la ingesta, Williams ha empezado a introducir en la alimentación de terneros extracto de sesos de animales con ECC. Sin embargo, la larga incubación de estas enfermedades (en el caso de EEB tal período se prolonga hasta 8 años) significa que los experimentos deben continuar durante varios años.

Si la cabaña de los Estados Unidos parece hallarse hasta ahora libre de ECC, no puede decirse lo mismo de otros animales. Si un ciervo infectado muere en el bosque, coyotes, linces y otros carnívoros se cebarán con lo que quede del cadáver. Además, durante la fase clínica, los animales con ECC constituyen una presa fácil. La familia Cánidos es evidentemente inmune a las enfermedades priónicas, pero las especies de la familia Félidos pueden contraerlas. Se ha empezado ya a estudiar la transmisión en pumas o leones de montaña.

Aunque muchos estados han descubierto la ECC, en otros estados —Arizona, Kansas, Michigan, Montana, Nevada y Nueva Jersey— se ha intensificado la labor de rastreo, de momento sin confirmación de su presencia. Por lo que parece, sólo existen bolsas de brotes. Si así fuera, los gestores de vida salvaje tienen una buena probabilidad de conseguir que la ECC no logre una implantación permanente en todo el país, a condición de que los esfuerzos de control empiecen con celeridad.

Para detener, o al menos frenar, la extensión de la enfermedad fatal, la mejor estrategia parece ser las entresacas extensivas. Cabe esperar que la ECC se dé naturalmente en los ciervos y que la epidemia siga su curso y deje atrás cérvidos resistentes a la ECC. Algunos linajes de corderos, por ejemplo, son inmunes a la tembladera. Pero hasta ahora, todos los venados de cola blanca y ciervos mulo parecen ser uniformemente susceptibles.

Bibliografía complementaria

RISK ANALYSIS OF PRION DISEASES IN ANIMALS. Dirigido por Corinne I. Lasmézas y David B. Adams, en *Scientific and Technical Review*, vol. 22, n.º 1; abril 2003.

THE PATHOLOGICAL PROTEIN: MAD COW, CHRONIC WASTING, AND OTHER DEADLY PRION DISEASES. Philip Yam. Copernicus Books, 2003.

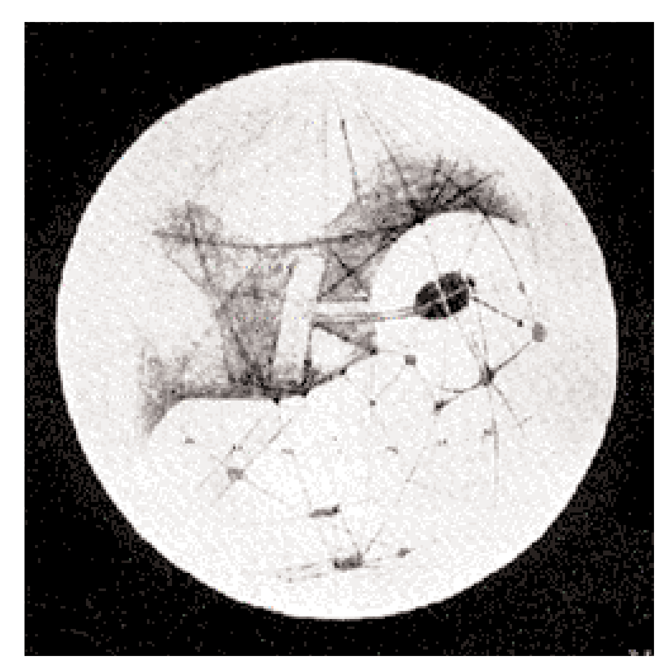
¿Vida en Marte?

Así parece

Giovanni Schiaparelli, desde el Observatorio de Brera en Milán, observaba en 1877 extrañas figuras geométricas sobre la superficie de Marte. Dos años más tarde, sus famosos "canali" adquirieron notoriedad. En 1886 Perrotin y su asistente Thollon, en Niza, gracias a un nuevo anteojo astronómico de 29 pulgadas de abertura, lograron confirmar los dibujos del italiano.

Pero crecería aún más quizá la fama de estos canales en 1906, con la obra de Percival Lowell. Este acomodado hombre de negocios de Boston se hizo construir un observatorio personal en Flagstaff, Arizona. Con él realizó mapas detallados de la superficie del planeta rojo, encontrando —e interpretando como posible prueba de vida inteligente— no sólo canales, sino también supuestos oasis que irrigarían los canales.

En la década de 1960 llegaron al planeta las sondas Mariner, que lograron atravesar con sus cámaras las impresionantes tormentas de polvo que dan al planeta su color rojizo, debido a la oxidación de rocas ricas en hierro. Pudo así la Mariner-9 descubrir en 1971 volcanes y cañones que empequeñecen a sus pares terrestres (el volcán apagado Olympus Mons tiene una altura tres veces superior al Everest). Luego, en 1976, siguieron las dos sondas Viking Orbiter y las dos Viking Lander; estas últimas se posaron en la superficie de Marte, llevaron a cabo complejos experimentos y obtuvieron imágenes panorámicas.



1. Dibujo de los canales, por Percival Lowell

Años más tarde, en el verano de 1997, lejos ya de las especulaciones sobre los canales, tras un viaje de 500 millones de kilómetros y siete meses de duración, la nave no tripulada Mars Pathfinder de la NASA llegó al mundo vecino. Su descenso en suelo marciano no fue de los más suaves. Tras emplear un complicado sistema de paracaídas y pequeños cohetes para perder velocidad, en el último tramo se desplegaron unas potentes bolsas de aire para amortiguar el tremendo impacto contra el suelo. El lugar elegido para el aterrizaje fue la región ecuatorial Ares Vallis, posiblemente el lecho de un cañón erosionado en el pasado por una corriente de agua caudalosa.

Pero esta sonda no sería la última. Abundaban las misiones planeadas para los años siguientes. La Mars Global Surveyor (MGS), diseñada inicialmente para orbitar el planeta durante dos años —un tiempo algo superior a un año marciano— llegó allá en septiembre de 1997. Enseguida darían sus descubrimientos de qué hablar. Apenas hubo entrado en órbita, su magnetómetro reveló un débil campo magnético marciano; más tarde, su cámara óptica enfocó la región de Cydonia, donde fotografías de baja resolución tomadas por la Viking Orbiter 1 en 1976 y peculiares juegos de luces y sombras se habían conjurado para mostrar una misteriosa "cara de Marte". Con una resolución diez veces mejor, la cara desapareció de Marte y del imaginario colectivo.

Durante todos estos años, la sonda MGS estudió las nubes, vigiló tormentas de polvo y realizó la cartografía completa de la superficie marciana con inigualable precisión. Pero éste fue un corto período de éxitos del que se esperaba sería un vasto programa de exploración a lo largo de dos décadas, con una docena de naves y muchos, muchos millones de dólares de presupuesto.

Ya se creía olvidada la mala experiencia de la sonda Mars Observer: el 21 de agosto de 1993 perdió contacto con la base de la Tierra; se habrá destruido o errará alrededor del Sol en una órbita con un período de unos 500 días. Pero los eventos sucesivos la traerían a la memoria: la sonda Mars Climate Orbiter desapareció de los radares el 23 de septiembre de 1999. Su destrucción fue debida a un error en el sistema de unidades utilizado en la navegación. Se acercó demasiado al planeta y, se presume, dio de lleno contra la atmósfera; se destruyó. Siguiente golpe bajo: la Mars Polar Lander, perdida en diciembre de 1999, aunque en algún momento se creyó percibir débiles señales de vida de sus emisores...

La Mars Pathfinder había estudiado las rocas; la Mars Polar Lander debía cavar en las zonas congeladas del polo sur marciano en busca de un elemento esencial

para la vida, tal y como nosotros la concebimos: el agua.

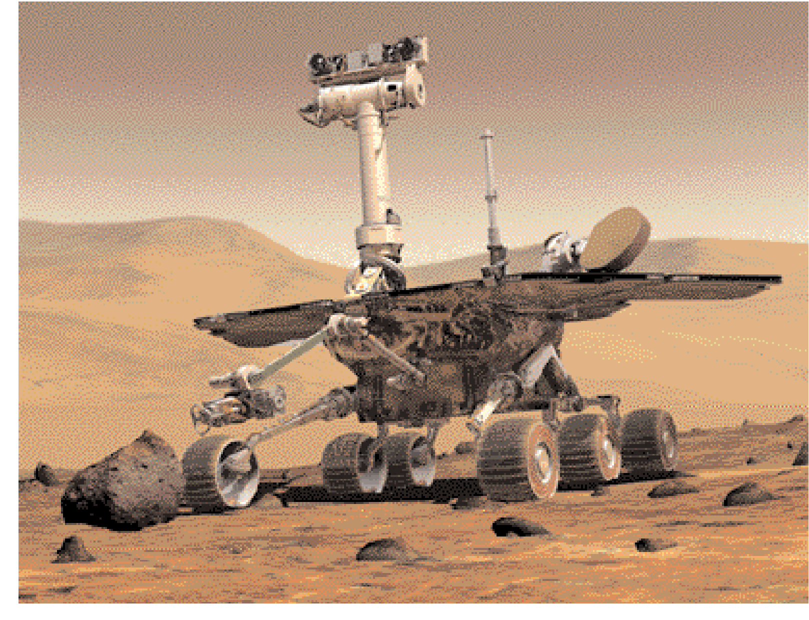
A pesar de esta sucesión de contratiempos, las imágenes y datos tomados por los nuevos instrumentos van dándonos una idea más precisa del pasado del planeta. Una posibilidad es que en el pasado fuera templado y húmedo. Sin embargo, los cauces secos de las fotografías plantean la pregunta: si hubo agua en el pasado, ¿adónde ha ido a parar?

Recientes estudios de los datos que la MGS ha aportado sobre la topografía y gravimetría marcianas llevan a pensar que existe un sistema de canales —ahora subterráneos, enterrados bajo sedimentos— que, miles de millones de años atrás, llevaban el agua desde las tierras altas del sur hacia el norte. Y no serían pequeños: las estimaciones actuales les confieren unos 200 km de ancho, miles de kilómetros de longitud y al menos entre 1 y 3 km de profundidad. Sin embargo, “resultados extraordinarios requieren pruebas extraordinarias”. El debate sobre si las pruebas son concluyentes o no sigue abierto.

La idea de que haya vida en Marte, o que la haya habido, ha cautivado siempre la imaginación. Hace varios años, un grupo de Stanford y la NASA anunció resultados de experimentos realizados sobre el meteorito de origen marciano ALH84001, encontrado en la Antártida. Su edad fue calculada en 4500 millones de años y provendría del interior del planeta. Se piensa que hace 3500 millones de años, con Marte más cálido y húmedo que ahora, el agua habría logrado penetrar por las fracturas hacia el interior, donde depositó carbonatos. Alrededor de 15 millones de años atrás, el impacto de un gran meteorito en la superficie de Marte debió de proyectar pedazos de roca fuera del planeta; tras vagar durante millones de años, uno de estos fragmentos habría entrado en la atmósfera terrestre y caído en nuestro polo sur hace tan sólo 13.000 años.

Se observaron diversas configuraciones minerales características de la actividad biológica, así como la presencia de trazas microscópicas que podrían asociarse a fósiles de organismos, de bacterias. Otro indicio fue el hallazgo de isótopos del azufre en el interior del meteorito. El azufre es un agente oxidante y, junto con otros compuestos orgánicos, podría conducir al desarrollo de la vida. Sin embargo, un grupo de químicos atmosféricos americanos mostró que las abundancias relativas de los diferentes isótopos del azufre halladas en varios meteoritos marcianos pueden explicarse por procesos puramente químicos de la atmósfera marciana, sin necesidad de bacterias u otro tipo de vida primitiva.

Las observaciones actuales de la sonda Mars Odyssey muestran grandes extensiones heladas alrededor de los casquetes polares, con temperaturas por debajo de la centena de grados bajo cero. Su espectrómetro de rayos gamma encontró además, cubiertas por otras capas más superficiales, dos regiones ricas en hidrógeno cerca de los polos. Estas recientes observaciones sugieren que el hielo es la fuente del hidrógeno que se ha detectado; indicaría la presencia de agua sólida en las capas más superficiales del planeta. Es un hallazgo científico con implicaciones filosóficas de suma importancia. Deberán ratificarlo otras observaciones.



2. Representación de uno de los dos vehículos robot que explorarán la superficie marciana desde comienzos de 2004. [Cortesía JPL-NASA]

Dos nuevas misiones no tripuladas de la NASA, las “Mars Exploration Rover 1 y 2”, dejarán caer en diferentes lugares del suelo marciano sendos vehículos todoterreno que buscarán trazas de agua líquida que pudiera haber existido en el pasado. Al mismo tiempo, se posará en el planeta una sonda de la Agencia Espacial Europea, la Beagle 2, llevada hasta allí por la nave Mars Express. Además, Nozomi, un satélite japonés, entrará por fin en órbita alrededor de Marte para estudiar su atmósfera, tras un retraso de cinco años.

Una de las preguntas que más intrigan a los científicos es por qué son tan distintos hoy la Tierra y Marte. En el momento de su formación compartían condiciones similares. La comparación de la historia y evolución de los dos planetas responderá muchos interrogantes sobre el pasado (y posiblemente el futuro) de la Tierra.

Por el momento, nada de Marte nos hace recordar aquella noche de Halloween, de octubre de 1938, en que unos invasores marcianos ficticios declaraban la guerra a la Tierra en la versión radiofónica de *La guerra de los mundos* que dirigió Orson Welles. *Teres atque rotundus*, lo llamaba Lowell, aprovechando la metáfora de Horacio: pulido y redondo, las perturbaciones no podían hacer presa en él. “Aunque su nombre recuerda al más turbulento de los dioses”, escribía Lowell, “Marte es hoy uno de los más tranquilos cuerpos celestes. Los antiguos parecen haber sido singularmente desafortunados con sus denominaciones: con Marte tan pacífico, Júpiter tan joven y Venus tan tímidamente envuelta en sus nubes, los nombres de los planetas concuerdan muy poco con sus temperamentos.”

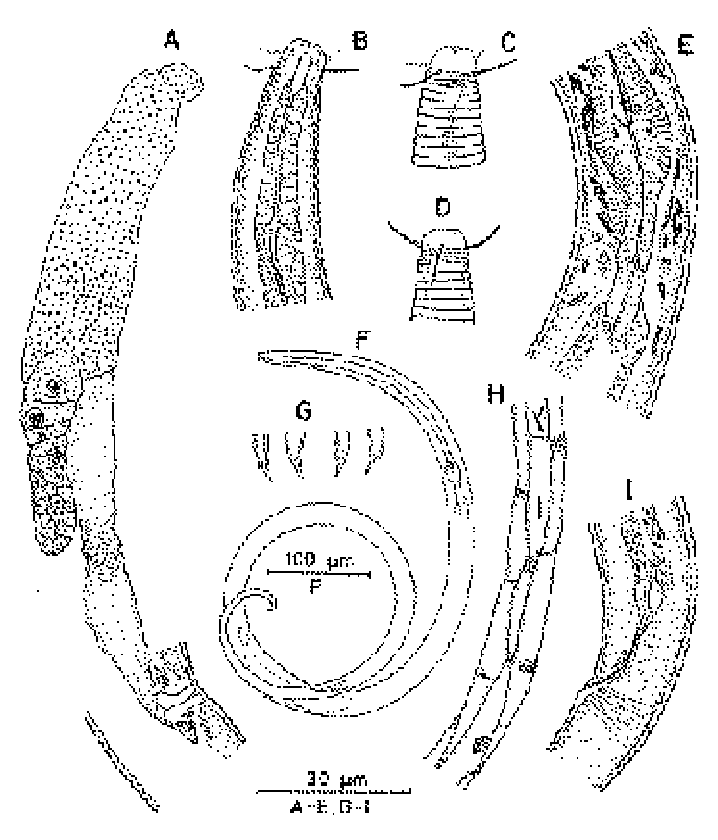
ALEJANDRO GANGUI
Instituto de Astronomía y Física del Espacio,
CONICET, y Departamento de Física,
Universidad de Buenos Aires

Fauna española

Nemátodos dulceacuícolas

Los nemátodos constituyen uno de los taxones zoológicos más abundantes y de más amplia distribución de todo el Reino Animal. En cualquiera de los medios donde están representados destacan también por ser uno de los que contribuyen con mayor biomasa.

Se trata de invertebrados, metazoos, triblásticos y pseudocelomados de aspecto vermiforme. Su tamaño varía, en el caso de los de vida libre, entre 0,25 y 8 mm. Habitan en los primeros centímetros de suelo o sedimento bañado por aguas continentales o marinas, concretamente en los espacios que quedan entre las partículas de sedimento. Se desplazan con movimientos ondulatorios sobre el plano dorsoventral. Hasta la fecha, los grupos de Nemátodos mejor estudiados, por su trascendencia económica, han sido los parásitos, en especial los fitoparásitos.



1. Chronogaster zujarensis *Ocaña & Coomans 1991.* F: *aspecto general del cuerpo.* B, C, D: *detalles del extremo anterior del cuerpo, donde se puede apreciar* (B) *la forma de la cavidad bucal.* G: *detalle del extremo de la cola en varios individuos.* A, E, H, I: *detalles de la gónada, extremo posterior del esófago, cordones laterales del intestino y recto, respectivamente. Todas esas características estructurales se observan por transparencia y son importantes a la hora de determinar la especie, lo que da una idea de la complejidad taxonómica del grupo*

A Enrique Gadea, catedrático de zoología en la Universidad de Barcelona y estudioso de la nematofauna de diversos ambientes, debemos los únicos datos relativos a nemátodos de vida libre publicados hasta principio de los años ochenta en España. Por esas fechas, algunos miembros del actual "Grupo Andaluz de Nematología", ubicados en las universidades de Jaén, Córdoba y Granada, abordamos la investigación de los nemátodos de vida libre edáficos. En nuestro caso nos centramos en el estudio de los nemátodos de ambientes acuáticos continentales. Más tarde surgieron otros grupos de trabajo en nematología de suelo en las universidades de Navarra, Valencia y Santiago.

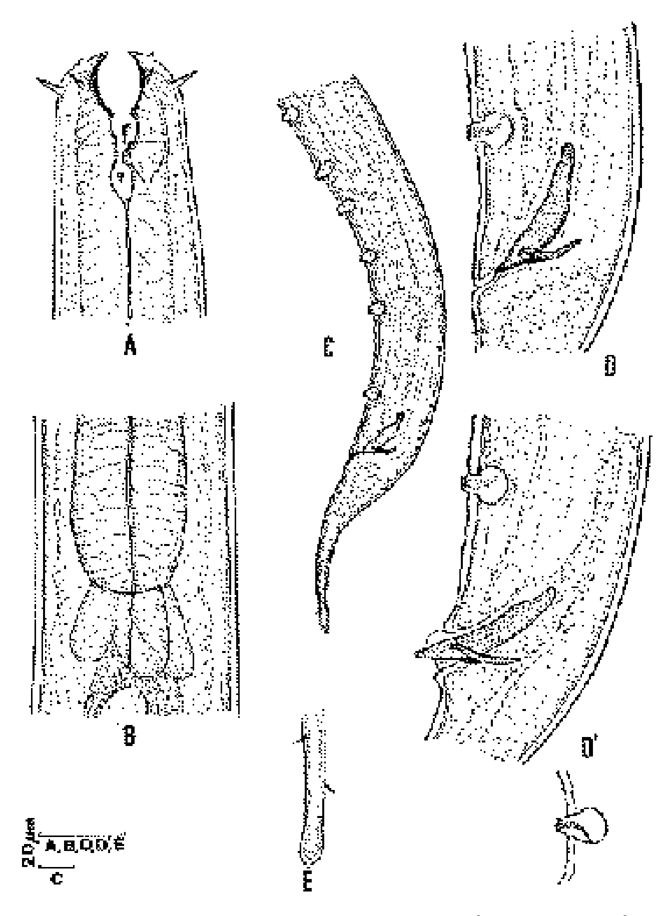
Los nemátodos dulceacuícolas son animales estrechamente relacionados con el sedimento de cualquier medio; se asocian también a masas algares o raíces de determinadas plantas acuáticas. Son frecuentes en zonas remansadas de ríos, en lagos, manantiales hipersalinos o termales, embalses, charcas, acequias y en cualquier medio donde la velocidad del agua no sea elevada, exista una mínima concentración de materia orgánica y el tamaño de grano del sedimento sea de tipo arena o limo, nunca superior al de grava. Entre los habitantes de aguas dulces hay unas especies de carácter anfibio, por aparecer tanto en medios acuáticos continentales como terrestres húmedos; otras son exclusivas de ambientes dulceacuícolas.

Entre los factores que pueden explicar mejor la organización de la comunidad de nemátodos de un medio acuático determinado, tenemos que destacar la posición trófica de sus componentes. Así, basándose en la estructura de la cavidad bucal y en la observación de restos en el tracto digestivo, el tipo de dieta que se atribuye a los diferentes órdenes es fundamentalmente algívora para los monistéridos, araeolaímidos y cromadóridos, que se alimentan sobre todo de microalgas verdes y diatomeas, aunque los representantes de los dos primeros órdenes señalados presentan además un marcado carácter bacteriófago.

Los monónquidos son depredadores típicos, lo mismo que muchos Enoplida. De éstos, los tobrílidos, muy abundantes en medios dulceacuícolas, se alimentan de protozoos, rotíferos, tardígrados, gastrotricos, pequeños oligoquetos o incluso otros nemátodos. La mayoría de los restantes enóplidos, con cavidades bucales inermes, son micrófagos (bacteriófagos); los hay omnívoros.

Aunque admiten una alimentación omnívora, predominan entre los dorilaímidos los que prefieren jugos vegetales, microalgas, materia orgánica particulada y, en concreto, las bacterias asociadas. Los hay depredadores.

Los rabdítidos, en particular los *Rhabditina* y *Diplogastrina*, bien representados en ambientes acuáticos continentales, son saprófagos o detritívoros. Dominan en su dieta las bacterias asociadas a la materia orgánica en descomposición. Algunos *Diplogastrina*, provistos de dientes, son exclusivamente depredadores. Los Rabditina, nemátodos de vida media muy corta, proliferan de forma muy rápida cuando la concentración de materia orgánica en el medio es elevada.



2. Brevitobrilus montanus *Ocaña, Hernández & Martín, 1996.* A: *detalle del extremo anterior del cuerpo y, en concreto, de la cavidad bucal con dientes de este tobrilido.* C, E: *extremo posterior del cuerpo de un macho y detalle de la cola.* B, D, D': *detalles del extremo posterior del esófago y del órgano copulador* (D) *y suplementos* (D') *preanales de un macho, respectivamente*

Desde el punto de vista de su ecología, unas especies están adaptadas a tolerar condiciones ambientales muy diversas e incluso extremas, si bien en el segundo caso su población se reduce de un modo drástico. Otras especies son exclusivas o al menos están representadas con poblaciones muy abundantes en determinados ambientes extremos. Así, hay especies termófilas, asociadas a manantiales termales; otras son características de medios acuáticos con altas concentraciones salinas, es decir, muy mineralizados, e incluso se hallan diferencias en las poblaciones de especies en función del ion predominante en el agua. También destaca la variación en la composición específica y poblacional en relación con la concentración de materia orgánica del medio.

Por todo ello los nemátodos constituyen unos excelentes bioindicadores de las características del medio; es decir, en la mayoría de los casos se muestran muy sensibles ante cambios ambientales, en particular a cambios en la calidad de las aguas. En función del tipo y concentración del contaminante orgánico o químico que defina el vertido, la nematofauna varía considerablemente. Conociendo, pues, la nematofauna de un ecosistema acuático y en concreto el porcentaje de las distintas especies representadas, podemos hacer un balance muy acertado de las características fisicoquímicas del mismo.

AMELIA OCAÑA
Dpto. de Biología Animal y Ecología
de la Universidad de Granada

Nanoelectrónica

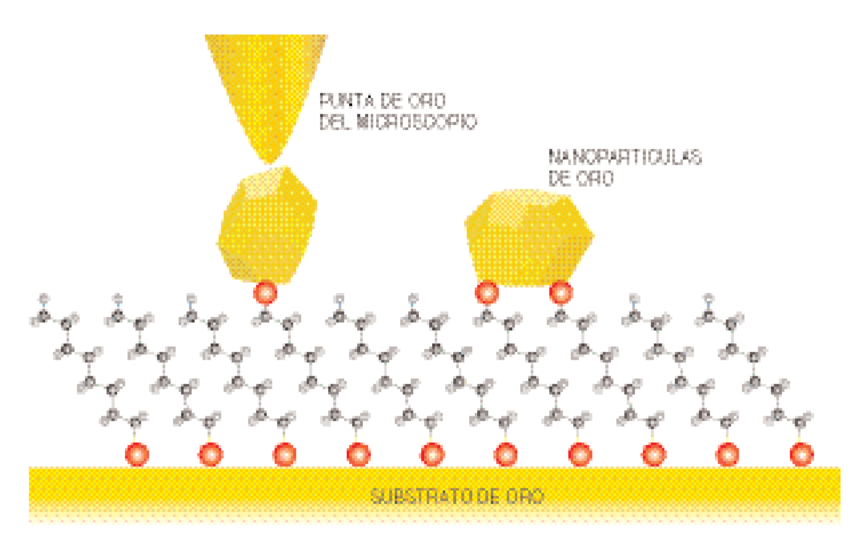
Medición de la conductividad de una sola molécula

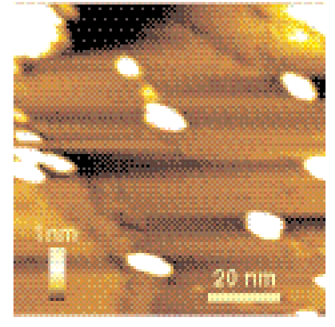
Con el paso de los años, los aparatos electrónicos son cada vez más pequeños. Hoy en día, los microprocesadores de las computadoras pueden contener miles de transistores en una superficie no más grande de un centímetro cuadrado. Pero, ¿hasta dónde puede llegar la pequeñez de un circuito, un capacitor o un cable? Una de las disciplinas que más han sobresalido estos últimos años por sus grandes avances ha sido precisamente la nanotecnología. Propone la construcción de dispositivos cuyos componentes sean moléculas, átomos o ambas cosas. Esa máxima miniaturización tendría gran importancia en la industria de la electrónica: los correspondientes artefactos serían sumamente rápidos. Los nanotubos de carbono (moléculas de forma tubular de un nanómetro de grueso con una gran capacidad de conducción de corriente) son un ejemplo de cómo la nanotecnología podría revolucionar la ciencia de los materiales y la electrónica. Pero otras áreas también se verían beneficiadas: la medicina, la conservación de energía y, por supuesto, la computación.

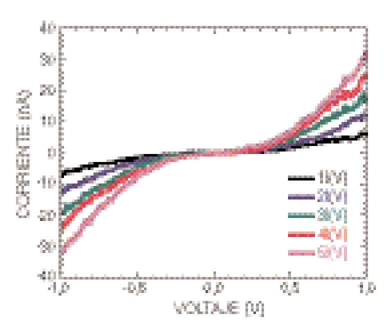
La dificultad de formar dispositivos con moléculas individuales es que el tamaño de éstas es de unos cuantos angstrom ($1Å = 1 \times 10^{-10}$ m). Por ejemplo, una molécula de clorofila mide casi 10 Å de diámetro; si alineamos una molécula al lado de otra, en un milímetro podríamos acomodar un millón. Estas dimensiones pequeñísimas no se pueden observar ni siquiera con un microscopio común. Por eso se necesitan instrumentos especiales, como el microscopio de efecto túnel (STM) y el microscopio de fuerza atómica (AFM). El primero puede detectar corrientes de magnitudes muy pequeñas (nanoampères) que pasan entre la punta del microscopio y la muestra; nos permite así crear imágenes de substancias a escala atómica. En el AFM, la punta va unida a un soporte flexible para barrer la superficie de la muestra con una fuerza constante. Las imágenes son generadas por las deflexiones del soporte, medidas con una resolución que cae en la escala de los angstrom. Aparte de estos instrumentos, para entender el comportamiento de moléculas individuales hay que ir más allá de la física clásica; es necesaria la mecánica cuántica.

Una de las características de una molécula que más cuenta cuando hay que decidir su función en cualquier

La figura superior es una representación gráfica del experimento (no a escala); se observa la monocapa mixta formada por moléculas de 1-octanotiol y de 1,8-octanoditiol. Los átomos de azufre están representados en color rojo; forman enlaces covalentes con oro. De esta manera, los ditioles están conectados con oro en sus dos extremos, mientras que los monotioles sólo están conectados al substrato. Con el STM se obtuvo una imagen de la monocapa (figura inferior izquierda)*, donde se ven claramente las nanopartículas de oro* (puntos grandes y brillantes)*. Con un AFM conductor se hizo contacto con esas nanopartículas, y se obtuvieron curvas de corriente en función del voltaje [I(V)]. Sólo se encontraron cinco curvas diferentes* (que se pueden observar en la gráfica)*: la magnitud de la corriente aumenta proporcionalmente según el número (de uno a cinco) de moléculas de 1,8-octanoditiol que se encuentren unidas a las nanopartículas*







dispositivo es la facilidad con que se transportan cargas a través de la molécula; es decir, su conductividad. Se la clasificará como aislante, conductora, capacitora, etc. Para determinar la conductividad de la molécula, es necesario conectarla por sus dos extremos, aplicar un voltaje y medir la corriente que pasa a través de ella. Pero, ¿es posible conectar una sola molécula? ¿Se puede medir una corriente tan pequeña? Gracias al STM y al AFM, es posible. Una molécula muy estudiada por varios grupos es el ácido desoxirribonucleico (ADN), donde se han obtenido resultados diferentes. Dependiendo del estudio, se ha encontrado que el ADN se comporta como aislante, semiconductor o conductor. Esta discrepancia en conductividades se puede deber a varias causas, como el no saber con certeza cuántas moléculas hay entre las conexiones, o que la fuerza de contacto entre la punta del microscopio y la muestra resulte tan fuerte que incremente considerablemente la corriente, sin que ello refleje la conductividad natural de la molécula.

No hace mucho, físicos y químicos de la Universidad Estatal de Arizona y de Motorola Inc. aplicamos un método con el que logramos hacer conexiones a moléculas individuales. Mediante un AFM conductor (microscopio de fuerza atómica con capacidad de medir corrientes muy pequeñas, como el STM), obtuvimos curvas de corriente en función del voltaje cuantizadas; medimos así la corriente de una sola molécula de 1,8-octanoditiol (una cadena de ocho átomos de carbono con un átomo de azufre en cada extremo). El azufre puede formar enlaces covalentes con el oro (un verdadero enlace químico). Esos octanoditioles estaban insertados y aislados unos de otros en una monocapa de moléculas de 1-octanotiol (monotioles), también una cadena de ocho átomos de carbono pero con un solo azufre en uno de sus extremos. Con esta monocapa mixta quedan al descubierto en la superficie átomos de azufre en cada lugar ocupado por una molécula de ditiol. La monocapa se incubó en una suspensión de nanopartículas de oro (de 2 nanómetros de tamaño); así, los ditioles formaron enlaces con oro en sus dos extremos (uno de ellos se enlaza al substrato de oro y el otro a una nanopartícula); los monotioles, en cambio, estaban unidos solamente al substrato. Con el STM se obtuvieron imágenes de la monocapa y con el AFM conductor se hizo contacto con 4000 nanopartículas de oro. De esta forma se obtuvieron más de 4500 curvas de la corriente en función del voltaje. En las imágenes del STM se pudo observar claramente la monocapa mixta y las nanopartículas de oro. Con el AFM conductor se obtuvieron solamente cinco curvas diferentes de la corriente en función del voltaje, múltiplos de una sola curva fundamental: si las curvas se dividen entre un número entero correspondiente ($N = 1, 2, 3, 4$ y 5), se convierten todas en la misma curva. Esto quiere decir que debajo de cada una de las nanopartículas de oro pueden encontrarse de una hasta cinco moléculas de 1,8-octanoditiol juntas. Por medio de un análisis estadístico, encontramos que el 25 % de las mediciones se hicieron donde había sólo una molécula; determinamos así que la resistencia de una sola molécula de 1,8-octanoditiol es de 900 ± 50 megaohms.

Pero, ¿qué nos permitió llegar a este resultado? La respuesta está en la conexión entre el metal y la molécula: un enlace químico es necesario. Durante la ex-

perimentación se observó que al hacer contacto con los ditioles unidos a las nanopartículas de oro, las curvas de la corriente en función del voltaje resultaban muy diferentes de las obtenidas con los monotioles de alrededor (que no tienen enlaces con nanopartículas de oro). Estas últimas eran menos reproducibles y la magnitud de la corriente mucho menor; además, presentaban una gran dependencia de la fuerza y voltaje aplicados al momento del contacto. Pero cuando el contacto se establecía con los ditioles, se observaba totalmente lo contrario: las curvas eran reproducibles, con mayor corriente e independientes de la fuerza de contacto.

Por lo tanto, una molécula conduce mucho mejor cuando va unida por un verdadero enlace; podríamos decir incluso que debe estar "soldada" a los contactos. Estos resultados nos enseñan la manera en que hemos de conectar las moléculas unas con otras para poder llegar a formar circuitos eléctricos.

XRISTO ZÁRATE KALFÓPULOS
Dpto. Química y Bioquímica
Universidad Estatal de Arizona, Tempe

Sismología histórica

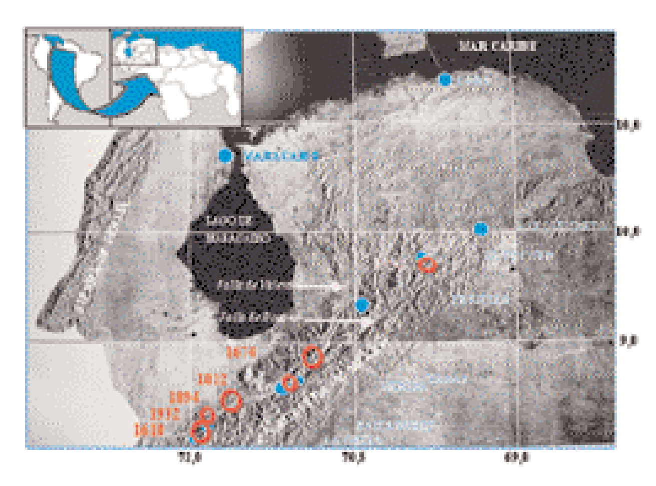
Terremotos en los Andes venezolanos

Los Andes venezolanos se extienden en dos ramales desde la frontera con Colombia, la Sierra de Perijá, con rumbo norte, y la cordillera de Mérida, con rumbo noreste. Esta última ha sufrido los estragos producidos por varios terremotos de singular violencia. De algunos se conserva memoria histórica.

La actividad sísmica se debe a la existencia del sistema de fallas de Boconó, la falla rumbo-deslizante que atraviesa longitudinalmente la cordillera y fallas inversas de los piedemontes andinos. Se hallan, todas ellas, integradas en un sistema que se extiende por la cordillera de Mérida y de la costa venezolana, inscrito, a su vez, en la zona de interacción entre las placas tectónicas del Caribe y de Sudamérica.

El movimiento relativo de la placa del Caribe con respecto a la placa sudamericana es lento (1,4 cm/año en dirección ESE). Por esa razón, los tiempos de retorno para terremotos grandes son largos, cercanos al tiempo transcurrido desde la colonización. En muchas áreas de la región andina los habitantes no son conscientes del peligro sísmico. Con una alta densidad de población, se desarrollan allí, lo mismo que en las zonas cercanas del piedemonte, importantes actividades económicas. En la costa oriental del lago de Maracaibo se ubica, además, uno de los centros petroquímicos del país.

La primera mención de grandes temblores de tierra en los Andes venezolanos data de 1578. Se refiere a la región de El Tocuyo, aunque sin mencionar ningún episodio en particular. Desde San Cristóbal, en el suroeste de la región andina (fuera del límite del mapa



1. Fotografía de radar de los Andes venezolanos (Petróleo de Venezuela S.A. 1977; levantamiento de radar). Se indican las ciudades (azul) *y algunos accidentes geológicos de la región, además de los epicentros aproximados* (rojo) *de los terremotos mencionados*

de la figura 1), llegan noticias de "grandes terremotos y temblores de tierra" a partir de 1597. En 1608, el cabildo de Trujillo solicita ayuda para construir una nueva iglesia "con más fortaleza y firmeza", que resista los "temblores de tierra" de la provincia.

Este período de actividad sísmica culminó con el terremoto del día de San Blas (3 de febrero) de 1610 en La Grita y Bailadores. La información histórica más impresionante del episodio se lee en una crónica de Fray Pedro Simón, quien pasó por la región año y medio después del suceso. Contado con extraordinaria viveza, algunos historiadores dudaron de su veracidad y lo atribuyeron a fabulación del autor. Pero la cartografía geomorfológica ha logrado reconstruir el fenómeno, ratificando lo expuesto por el cronista.

Da testimonio del mismo un ingente alud de escombros, estimado en 15-20 millones de metros cúbicos, que se originó en el flanco sur del páramo de Mariño, cerca de Bailadores. Se formó un dique que represó el



2. Iglesia de Belén, Mérida, dañada por el Gran Terremoto de los Andes 1894. (Fotografía de Pedro Pablo Romero González. Se encuentra en la Biblioteca Nacional en la Trinidad, Caracas)



3. El terremoto de 1812, óleo de Tito Salas que se encuentra en la Casa Natal del Libertador, Sala Menor, Caracas. A raíz del terremoto, Simón Bolívar pronunció la celebre frase: "Si la naturaleza se opone a nuestros designios, lucharemos contra ella y haremos que nos obedezca"

río Mocotíes y se creó una laguna navegable; a los cinco meses, se vació al romperse el dique natural. Los estudios de las intensidades y las pruebas encontradas en una trinchera que atraviesa la falla de Boconó, al norte de La Grita, han cifrado la magnitud del temblor en 7,1-7,3 en la escala de las ondas superficiales.

Otro terremoto de magnitud probable cercana a 7, desencadenado el 16 de enero de 1674, destruyó las ciudades de Mérida y Trujillo. Como en el episodio anterior, lo más impactante fueron los movimientos de masa, que acabaron con las haciendas de cacao del piedemonte noroccidental de los Andes; el cacao constituía el sustento económico de sus gentes. El terremoto, las enfermedades, plagas e invasiones de piratas franceses agravaron la desolada situación económica del occidente de Venezuela durante la segunda mitad del siglo XVII. En 1680 Mérida seguía abandonada, con los edificios sin reparar. La población prefirió vivir en el campo. En Trujillo se produjo también un movimiento de emigración.

El peor terremoto del que la población venezolana tenga memoria se registró el 26 de marzo de 1812. Era la tarde del Jueves Santo. Los escombros del palacio episcopal de Mérida mataron al obispo cuando regresaba de la ceremonia del lavatorio de los pies. Si bien este terremoto destruyó nuevamente la ciudad de Mérida, causando numerosos muertos, actualmente, muchos investigadores consideran que se trató de un seísmo local, distinto del que arruinó esa misma tarde Caracas y otras ciudades del centro del país.

El 28 de abril de 1894 ocurrió el llamado "Gran Terremoto de los Andes", cuya magnitud se estima en torno a 7. Las mayores destrucciones se produjeron en ciudades que se encuentran a unos 50 km al sudoeste de Mérida. Hubo 319 bajas y se produjeron daños materiales desde Bailadores hasta Tabay, al noreste de Mérida. En esa época la población de los Andes era mucho mayor que en 1610. Gracias a la información detallada de varios registros y artículos de la prensa local se conoce mejor el cuadro de destrucción ocurrido. De nuevo se produjeron grandes movimientos de masa. No hay acuerdo entre los sismólogos sobre si el episodio se debió a una rotura de la propia falla de Boconó, probablemente una repetición de 1610, o si el foco correspondía a otra falla en la región, como sugiere la distribución de las intensidades.

En el siglo XX se conocieron dos episodios sísmicos importantes, el del 16 de marzo de 1932 cerca de La Grita, y el del 3 de agosto de 1950 en El Tocuyo. Sobre el primero (magnitud ~6,8) se han realizado muy pocas investigaciones. El segundo fue de menor magnitud (Ms = 6,3), aunque más significativo para la historia venezolana, porque El Tocuyo fue la primera fundación colonial en los Andes y en ese terremoto sufrieron daños graves varios edificios históricos de la ciudad. Tras el terremoto se demolieron muchos edificios, lo que supuso una pérdida irreparable de patrimonio.

CHRISTL PALME DE OSECHAS
Centro Regional de Investigación Humanística, Económica y Social (CRIHES)
Universidad de los Andes, Trujillo, Venezuela

Observaciones de explosiones estelares en rayos X

La recuperación de Nova Ophiuchi 1998

Las explosiones de novas son muy frecuentes; en nuestra galaxia ocurren unas 30 cada año. Son fenómenos muy violentos y energéticos a los que se debe la síntesis de algunos de los elementos químicos del universo. Las luminosidades intrínsecas que alcanzan (energía radiada por unidad de tiempo) superan la luminosidad del Sol entre 10.000 y 100.000 veces.

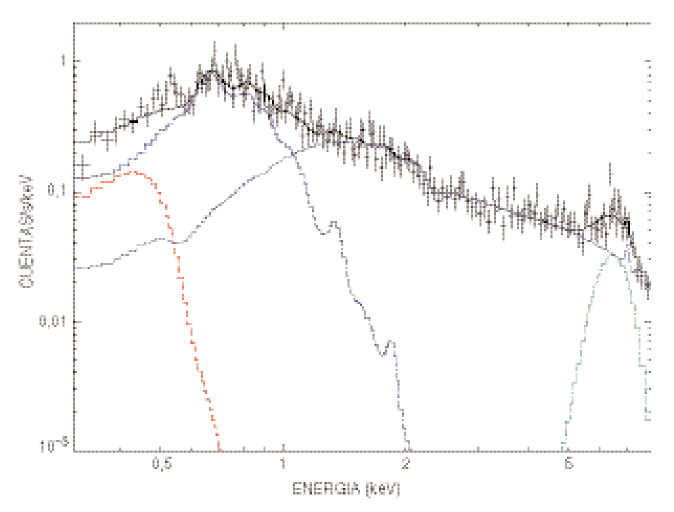
El origen de la denominación *nova* viene de *nova stella*, en referencia a la aparición súbita de una estrella en el cielo, en un lugar donde antes no había (que se viese) nada. La desaparición aparente de la nova es también muy rápida, ya que ocurre en unas pocas semanas. El origen del fenómeno es la explosión termonuclear del hidrógeno acumulado en la superficie de una enana blanca, procedente de una estrella compañera próxima a ella. Las enanas blancas aisladas representan la fase final de la evolución de las estrellas cuya masa inicial es inferior a unas 10 veces la masa del Sol; la mayor parte de las estrellas cumple esta condición. La posibilidad de obtener energía a partir de reacciones nucleares de fusión en su interior se ha agotado, por lo que su único destino es *apagarse* lentamente; la masa de las enanas blancas es similar a la del Sol y su tamaño parecido al de la Tierra: alcanzan enormes densidades y altísimas gravedades superficiales, cientos de millones de veces superiores a la terrestre.

Cuando una enana blanca se halla en un sistema doble, con una estrella compañera similar al Sol (aunque de masa y tamaño menores) muy próxima a ella

(aproximadamente a la misma distancia que la Tierra de la Luna), su destino cambia. En este sistema, denominado *variable cataclísmica*, la enana blanca arranca material de la estrella compañera, rica en hidrógeno; genera un disco alrededor de la enana blanca, de forma que va cayendo materia sobre ésta. La acumulación de masa sobre la superficie continúa hasta que se alcanzan las condiciones críticas que desencadenan las reacciones de fusión termonuclear del hidrógeno. Como consecuencia de estas reacciones nucleares, se produce un alud térmico, es decir, un aumento descontrolado de temperatura que provoca un aumento colosal del tamaño de la estrella, con el consiguiente aumento de la luminosidad, que se multiplica más de un millón de veces, acompañado por la eyección de materia a grandes velocidades (de centenares a miles de kilómetros por segundo). La explosión afecta a la envoltura de la estrella (una diezmilésima parte de la masa total), pero no a su interior. Por ello, las explosiones de novas son recurrentes, con períodos aproximados de decenas de miles de años.

Las observaciones de novas en rayos X son muy importantes para determinar su estado postexplosivo; una vez se ha eyectado su envoltura, la superficie de la enana blanca continúa albergando una combustión pacífica del hidrógeno. La fotosfera (superficie radiante visible) de la enana blanca debe hallarse, pues, a temperaturas muy elevadas (a centenares de miles de grados, frente a los 6000 grados de la superficie del Sol). A tales temperaturas, la radiación térmica emitida cae en el rango de los rayos X, mucho más energéticos que la luz visible y sólo observables con satélites, ya que son absorbidos por la atmósfera terrestre. Nuestras observaciones con el satélite XMM-Newton (X-ray Multi Mirror Mission, o Misión Multiespejo para Rayos X) de la Agencia Espacial Europea (ESA) tienen como objetivo estudiar la duración de la combustión residual de hidrógeno en novas recientes, para determinar propiedades de la explosión (por ejemplo, la cantidad de masa eyectada) y estudiar cómo se *apagan* las novas. Hoy en día aún existe controversia respecto a la duración de la fase de apagado, ya que la teoría predice entre decenas y centenares de años, mientras que las observaciones, aún muy escasas, indican tiempos mucho menores. Este panorama va a cambiar con los medios de observación disponibles actualmente, como el mencionado satélite XMM-Newton; se podrán observar objetos mucho más lejanos y, en consecuencia, mejorar la estadística al aumentar el número de novas observadas.

Una de las fuentes que hemos observado es Nova Ophiuchi 1998, que fue descubierta ópticamente el 15 de junio de 1998. Evolucionó muy deprisa; en tan sólo una semana su luminosidad se redujo a una décima parte. Se estima que se encuentra a más de 30.000 años-luz. Realizamos la primera observación con XMM-Newton el 25 de febrero de 2001, 986 días después de la explosión. Para nuestra sorpresa, el espectro de emisión en rayos X se extendía hasta energías mucho más altas que las esperadas para una emisión fotosférica a unos 100.000 grados. Se interpreta esa emisión a altas energías X como una radiación de *bremsstrahlung*,



Espectro de rayos X de Nova Ophiuchi 1998. Las cruces corresponden a las observaciones (con sus márgenes de error) y la línea continua es el modelo que mejor se ajusta a ellas. En rojo se indica la contribución fotosférica (aproximada a la de un cuerpo negro), en azul la de la radiación de frenado (dos componentes, a baja y alta temperatura), y en verde la línea de emisión fluorescente del hierro a 6,4 keV

o radiación de frenado (que emiten los electrones frenados por el campo eléctrico de los iones), asociada a la caída de materia sobre la enana blanca. Además, se distingue claramente una componente extra asociada a la emisión fluorescente del hierro neutro; dicha línea de emisión, a 6,4 keV (1 keV = $1{,}6 \times 10^{-16}$ J) es característica de los discos de acreción, donde los rayos X de alta energía son absorbidos fotoeléctricamente por átomos de hierro *fríos*. Se ha detectado la línea de fluorescencia del hierro en sistemas en los que hay discos de acreción alrededor de enanas blancas (variables cataclísmicas), así como en sistemas similares de mayor masa y tamaño: los núcleos activos de galaxias, en los que un disco gigante es capturado por un agujero negro de gran masa.

Lo que sorprende en el caso de la Nova Ophiuchi 1998 es que la emisión asociada a la caída de materia se produzca tan pronto después de la explosión, ya que se supone que la explosión destruye el disco de acreción e inhibe la transferencia de materia durante más de 1000 días. La extraordinaria, por lo rápida, recuperación de la Nova Ophiuchi 1998 obliga a replantear las ideas respecto a la interacción de la materia expulsada durante la explosión con la materia que cae procedente del disco de acreción; al menos en el caso de esta nova, la explosión no afectó de forma apreciable al disco, o bien éste recuperó muy rápidamente su estado anterior. Las nuevas observaciones con el satélite XMM-Newton de ESA y con el satélite Chandra de NASA nos van a permitir dilucidar, en un futuro próximo, si este comportamiento es aislado o se observa también en otros sistemas.

MARGARITA HERNANZ y GLORIA SALA
Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña (CSIC), Barcelona

DE CERCA

Autores: Covadonga Orejas, Tilman Alpermann
y Josep-Maria Gili

La paradoja de los arrecifes de coral y las selvas tropicales



1. Selva tropical de la isla de Seychelles. El hombre introdujo especies alóctonas para su explotación, que han terminado por incorporarse plenamente en la comunidad

Muy distintos a primera vista, bucear en un arrecife de coral y caminar por un bosque de los trópicos producen, sin embargo, impresiones convergentes. Cuando observamos de cerca ambos sistemas aparecen, de inmediato, innumerables coincidencias.

Adentrarse en la pluviselva constituye una experiencia única para los sentidos, tal es la riqueza de estímulos que nos ofrece el ecosistema. La piel siente el calor húmedo del entorno; a través del olfato percibimos una sutil gama de olores de las sustancias que rezuma una vegetación rica en diversidad de especies y colorido, un placer para los ojos del naturalista.

Los bosques tropicales se definen, en efecto, por la riqueza y diversidad de especies; también, por el gran tamaño de los árboles, por los organismos que habitan en sus copas y sus troncos. Se desenvuelve tal eclosión de vida sobre un suelo pobre en nutrientes, oligotrófico por emplear el tecnicismo. ¿Cómo explicar semejante paradoja? No es difícil desatar el nudo. La pluviselva presenta un intenso ritmo de actividad, que comporta la circulación incesante de los nutrientes, o su uso: todo lo que se produce se consume. No queda tiempo para la acumulación en el suelo.

En ello la pluviselva coincide con los arrecifes de coral, donde encontramos también temperaturas elevadas y un sinfín de estímulos sensoriales que proceden de corales potentes cuyos esqueletos, inmensos, tejen auténticas barreras submarinas, donde medran peces de toda forma, tamaño y color. Pero la arena blanca y el agua transparente nos hablan, también, de la escasez de nutrientes, de la oligotrofia que caracteriza este sistema. Lo mismo que en el bosque tropical, aquí todo circula con frenesí, en un circuito casi cerrado.

A ambos ecosistemas les une su extrema fragilidad. La pluviselva apenas resiste la tala. Su suelo, exhausto de nutrientes, no puede ofrecer el sustrato necesario para que el bosque pueda regenerarse de nuevo. Los arrecifes de coral no soportan por procesos inducidos de eutrofización (incorporación antropógena de nutrientes al medio): la abundancia de nutrientes advenida fomenta la proliferación masiva de algas que cubren los corales, compitiendo con ellos por el espacio y provocando, en muchos casos, el exterminio en masa de los corales.



2. Sotobosque de una selva tropical. Unas plantas trepan sobre otras en busca de luz



3. Zona regenerada de la selva tras un incendio



4. Arrecife de coral de las islas Seychelles, dominado por corales cuyo esqueleto calcáreo conforman la estructura tridimensional del arrecife y crean hábitat para multitud de especies



5 Arrecife del mar Rojo. Predominan las gorgonias, que crecen en zonas de fuertes corrientes



6. Arrecife del mar Rojo. Predominan los alcionarios. Se aprecia una pequeña parte de la diversidad de estos sistemas tropicales

Autorreparación de

Al no poder suprimir del todo los fallos de un sistema, es importante recuperar cuanto antes las condiciones de servicio

Armando Fox y David Patterson

Las prestaciones de la computación digital se han multiplicado por diez mil en los últimos veinte años: los cálculos que en 1983 consumían un año se realizan hoy en menos de una hora. Un ordenador de mesa de aquella época no alcanzaba la potencia de procesamiento de las nuevas agendas de bolsillo.

Estamos pagando un precio por estos adelantos. A medida que crece la complejidad de los sistemas digitales, su funcionamiento se hace más frágil e incierto. Ya no nos extraña que el ordenador personal se bloquee o que un sitio de Internet quede desconectado de la red. Las actualizaciones de los programas, concebidas para elevar el rendimiento, pueden agravar aún más la situación. Aparte de la incomodidad, hay que considerar la repercusión económica: los gastos anuales de mantenimiento, reparaciones y explotación exceden ampliamente los costes totales de los equipos y programas informáticos, tanto para los individuos como para las empresas.

Nuestro equipo de investigación de la Universidad de Stanford y la Universidad de California en Berkeley adopta un enfoque nuevo. Aceptamos como inevitables los fallos de sistema y los errores de los operadores humanos. En vez de intentar que los ordenadores no se paren ni una vez —tarea seguramente imposible—, preferimos diseñar sistemas que se recuperen con rapidez cuando quedan fuera de servicio. Llamamos ROC (*recovery-oriented computing*, computación orientada a la recuperación) a este enfoque informático donde la recuperación se convierte en objetivo primario.

Decidimos concentrarnos en refinar los programas de los sitios de Internet. Se trata de sistemas informáticos de gran dinamismo, que han de evolucionar y crecer con rapidez para responder a las demandas de consumidores y las presiones del mercado sin dejar de atender a los usuarios que esperan acceso instantáneo en cualquier momento. Tomemos como ejemplo el buscador Google, que hace muy pocos años localizaba unos cientos de millones de páginas Web en inglés y ahora proporciona tres mil millones de páginas en más de 20 idiomas, en una docena de formatos y además con imágenes. Mientras tanto, el número de búsquedas diarias en Google ha crecido desde 150.000 hasta 150 millones; el sitio está mil veces más ocupado que en sus principios.

La constante necesidad de perfeccionar el equipo físico y la programación de los sitios de Internet encarece demasiado la aplicación de muchas de las técnicas de ingeniería que anteriormente se utilizaban para asegurar el funcionamiento del sistema. Esperamos, pues, que los programas de Internet sean un buen campo de experimentación para nuestras ideas, y tal vez modelo para otros sistemas de computación, incluidos los ordenadores de mesa y portátiles. Los principios de

ordenadores



SLIM FILMS

ROC no sólo valen para las grandes máquinas computadoras; también pueden sacar provecho de ellos las más pequeñas.

Siguiendo una táctica bien comprobada desde el siglo XIX —la época de los puentes de ferrocarril de hierro fundido—, empezamos por aprender de los fallos anteriores. En concreto, nos preguntamos por qué caen los sistemas de Internet y qué se puede hacer para evitarlo. Con cierta sorpresa descubrimos que gran parte de los problemas se debían a errores humanos. Los esfuerzos tradicionales por asegurar el funcionamiento de programas y equipos no han contado mucho con la posibilidad de los fallos humanos, y sin embargo es frecuente que las interrupciones por errores de manipulación sean las más prolongadas (*véase el recuadro* "¿Quién tuvo la culpa?").

Los operadores tropiezan con dificultades de esta índole porque en el diseño de los equipos y programas informáticos muchas veces se ha sacrificado la facilidad de manejo para conseguir mejores prestaciones. La gestión de los programas de una base de datos, por ejemplo, puede exigir un cuerpo permanente de administradores bien capacitados. Si bien, por una parte, los costes de equipos y programas se han ido reduciendo en el transcurso del tiempo, los salarios de los operadores han llegado a constituir el gasto mayor en la explotación de un sitio de Internet complejo.

Nuestro grupo tiene presentes esas circunstancias. Trabaja sobre cuatro principios que han de guiar la construcción de sistemas informáticos que se atengan a ROC. En primer lugar, el pronto restablecimiento: sin duda van a aparecer problemas, y por tanto el diseño del sistema tiene que favorecer la recuperación rápida. En segundo, los suministradores han de proporcionar mejores herramientas para localizar el origen de los fallos en sistemas con múltiples componentes. En tercero, deben programarse los sistemas de manera que admitan una función "deshacer" (semejante a la que existe en los programas de proceso de textos), de manera que los operadores puedan corregir sus propios errores. Por último, debe haber la posibilidad de inyectar errores de prueba, con el fin de evaluar el comportamiento del sistema y contribuir a la capacitación de los operadores. Nuestro propósito es entregar gratuitamente a los informáticos los programas orientados a la recuperación (ROC) que estamos preparando.

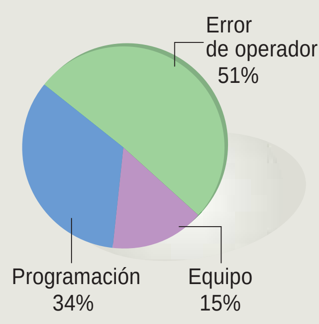
Con miras a promover la adopción de nuestra estrategia, recomendamos también el desarrollo y la distribución de programas de calibración que determinen la velocidad de recuperación del sistema informático. Estos programas medirían el progreso en la seguridad de que los sistemas funcionen; estimularían a las empresas a fomentarlo.

¿QUIEN TUVO LA CULPA?

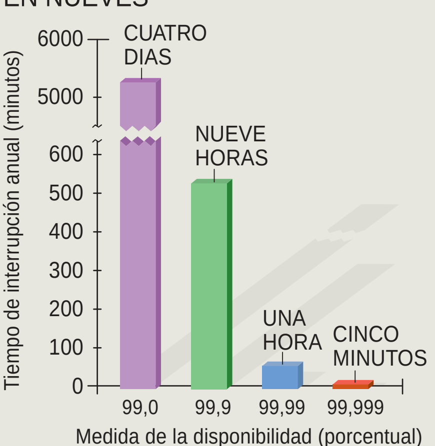
Suele ocurrir que al intentar mejorar la fiabilidad de los sistemas de ordenadores no se tenga muy en cuenta que los operadores pueden equivocarse. Pero en muchos casos los errores humanos provocan interrupciones del funcionamiento más largas que las averías físicas del equipo o los defectos de los programas. El diagrama (*derecha*) ilustra la distribución de las causas típicas de fallo en tres sitios de Internet.

En numerosos campos, las interrupciones de ordenadores pueden resultar muy costosas, e incluso poner vidas en peligro. Se llama disponibilidad la proporción de tiempo durante la cual un sistema funciona correctamente. Suele expresarse en "nueves" (*gráfico*). Si, por ejemplo, un sistema funciona sin caídas el 99,999 por ciento del tiempo, diremos que tiene una disponibilidad de "cinco nueves", unas dos horas de fallo en 25 años de funcionamiento. En lugar de procurar reducir el número de fallos, los que abogan por la programación orientada a la recuperación recomiendan métodos que acorten el tiempo necesario para reponer los sistemas. Incrementar la disponibilidad desde dos nueves hasta cinco nueves significaría que el tiempo de inactividad pasaría de 90 horas a cinco minutos por año.

MOTIVOS DE FALLO DE UN SITIO WEB



TIEMPO DE INTERRUPCION EN NUEVES



Resumen/*Informática fiable*

- Pese a la indudable potencia de los ordenadores actuales, no deja de inquietar a los usuarios su persistente falta de fiabilidad. La computación orientada a la recuperación (ROC) podría aliviar mucho esta situación.
- Los principios ROC —la incorporación de medios de recuperación rápida, herramientas informáticas que localicen los fallos con presteza, instrucciones de "deshacer" que borren errores humanos y procedimientos de inyección de errores que pongan a prueba la capacidad del sistema de entrar de nuevo en servicio— podrían evitar gran parte de los fiascos de la informática.
- Los programas de calibración que evalúen la velocidad con que los sistemas se reponen servirán de estímulo para mejorar la seguridad de funcionamiento.

JOHNNY JOHNSON, FUENTE DEL GRAFICO SUPERIOR: DAVID OPPENHEIMER

Rápida vuelta a la normalidad

Para muchos usuarios, reiniciar el ordenador personal, sea para curarse en salud cuando la máquina se comporta de un modo extraño o como salida a que se haya "colgado", no es una operación infrecuente. Resulta útil también con los grandes ordenadores, porque devuelve a un estado inicial y soluciona toda una gama de "fallos transitorios". Por desgracia, la mayoría de los sistemas tardan largo tiempo en reiniciarse, y lo que es peor, pueden perder datos en el proceso. Como alternativa, recomendamos diseñar sistemas que se reinicien gradualmente. Si pudiéramos ver un ordenador por dentro, contemplaríamos la ejecución de numerosos programas diferentes que trabajan conjuntamente. Durante la compra "en línea", por ejemplo, unos módulos lógicos permiten la exploración de las mercancías existentes, otros la incorporación de artículos a la "tarjeta de compras" del usuario y, por último, intervienen los que se encargan de completar la compra. Pero todavía hay un nivel más de programación, que coordina todas estas funciones y configura con ello la experiencia general de utilizar el sitio; este nivel cuida de que cada secuencia de programas cumpla su cometido en el momento preciso.

De ordinario, sólo uno de estos módulos tropieza con dificultades, pero cuando el usuario reinicia el ordenador se detienen inmediatamente todos y cada uno de los programas que se estaban ejecutando. Si se pudiera reiniciar por separado cada uno de los módulos componentes, quizá no habría nunca que reiniciar la colección completa. Bastaría con arrancar de nuevo sólo los módulos afectados para solucionar el problema. Si la operación fracasara, podría probarse con la reiniciación de un grupo de módulos más amplio. El quid de la cuestión consiste en reiniciar un módulo sin que los demás interpreten que hay un error general; es comparable a sacar de una pila de platos el del fondo sin derribar los que tiene encima: difícil, mas no imposible.

Los autores

ARMANDO FOX y DAVID PATTERSON llevan muchos años estudiando la fiabilidad de los sistemas de ordenadores. Fox es profesor adjunto en la Universidad de Stanford desde 1999. Siendo todavía alumno de doctorado de la Universidad de California en Berkeley, trabajó con el profesor Eric Brewer en aplicaciones de Internet para dispositivos portátiles, como el primer navegador Web gráfico para agendas digitales personales. Colaboró además en el diseño de microprocesadores en Intel y fundó luego una pequeña empresa de informática móvil. Se licenció en ingeniería eléctrica y ciencias informáticas por el Instituto de Tecnología de Massachusetts y la Universidad de Illinois. Patterson es bien conocido por los manuales que ha escrito y sus trabajos en la simplificación de la arquitectura de los microprocesadores y la construcción de sistemas fiables de almacenamiento digital.

George Candea y James Cutler, alumnos de doctorado de nuestro grupo, se han dedicado a desarrollar está técnica de reiniciación independiente, que llamaremos microrreiniciación. Cutler sabe lo que es construir receptores terrestres de bajo coste para señales de satélites con componentes de ordenadores personales viejos, aparatos de radioaficionado baratos y programas experimentales. Los fallos de funcionamiento de una estación así son comunes; de no estar presente un operador que reactive el equipo manualmente, se perdería la señal del satélite y con ella los datos de una órbita.

El año pasado, Candea y Cutler ensayaron la microrreiniciación de los programas de una estación terrena. Junto con otros compañeros, modificaron cada módulo de programa de la estación receptora de manera que no sufriera "pánico" si se reiniciaban los demás módulos componentes. Primero consultaron a los operadores humanos para conocer las causas de fallo más frecuentes, y luego determinaron mediante pruebas los conjuntos de componentes que habrían de reiniciarse para remediar esas anomalías concretas. Consiguieron así automatizar el proceso de recuperación para toda una gama de problemas recurrentes, con lo que el tiempo medio de restauración se redujo de diez a dos minutos, rapidez suficiente para que la estación afectada volviera a adquirir la señal del satélite y siguiese recogiendo datos de la órbita más reciente.

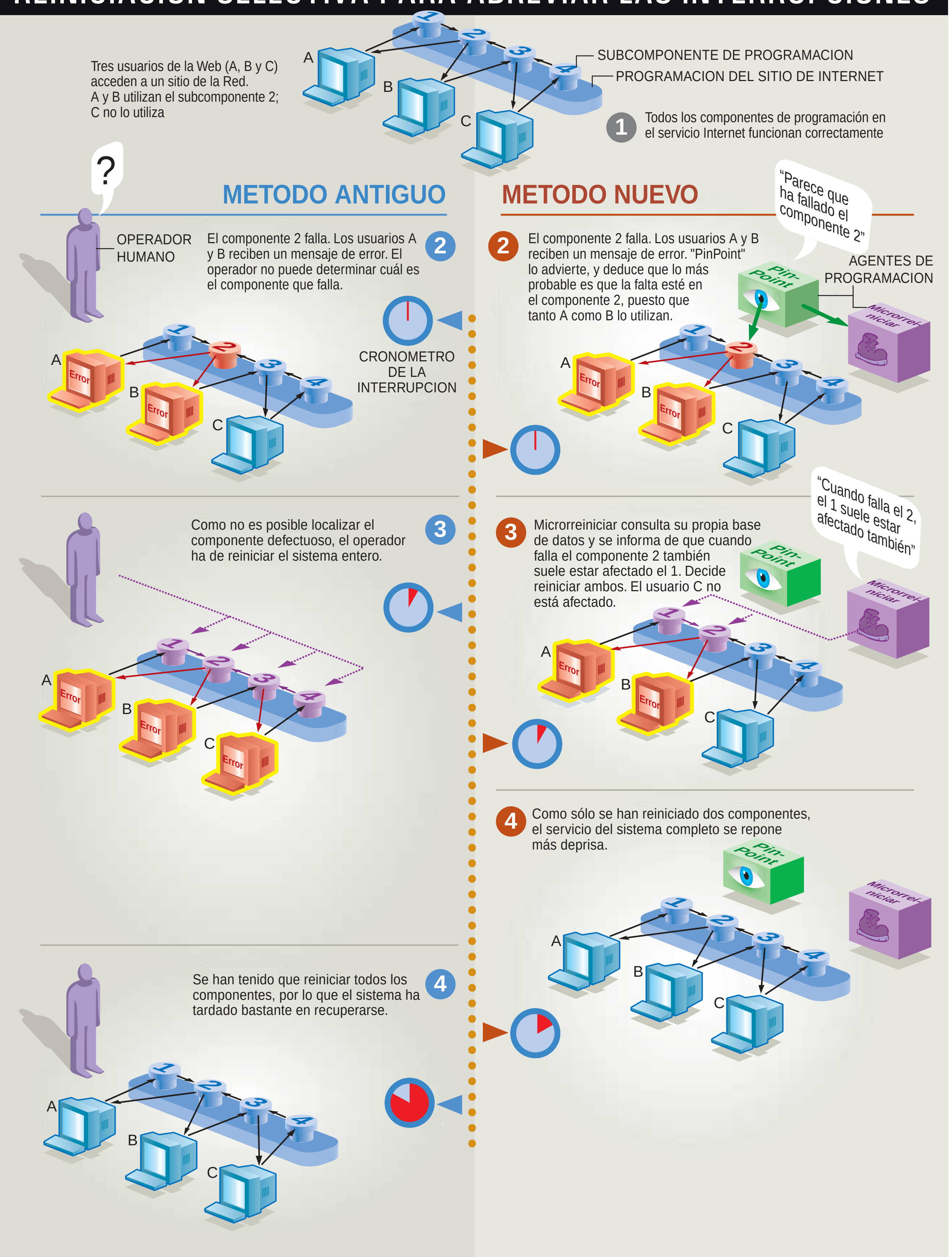
La "seguridad de funcionamiento" de un sistema es una combinación de su fiabilidad, o probabilidad de que ejecute una operación, y de su "disponibilidad", el porcentaje de tiempo en que funciona correctamente. La disponibilidad se mide en "nueves": si un sistema funciona bien el 99,999 por ciento del tiempo, diremos que es de "cinco nueves", o dos horas de interrupción en 25 años de servicio. Pero un sistema ordinario de ordenadores bien gestionado estará disponible sólo del 99 al 99,9 por ciento del tiempo ("entre dos y tres nueves"). Pasar de dos nueves a cinco nueves ahorrará casi 90 horas de interrupción al año; no es poco cuando la pérdida de servicio cuesta mucho dinero. De dos maneras se puede lograr una seguridad de funcionamiento elevada: que haya menos interrupciones o, en su defecto, que se restablezcan los sistemas con mayor rapidez.

Para los operadores de estaciones terrenas de satélite tiene mucho más valor reducir a la quinta parte el tiempo que tarda en reponerse el servicio que quintuplicar el tiempo transcurrido entre fallos (una medida de la fiabilidad), aun cuando una y otra reforma mejorasen en el mismo grado la disponibilidad. Creemos que ese umbral es característico de diversos sistemas de cómputo.

Costó mucho trabajo modificar a mano los programas de la estación terrena; Candea y uno de los autores (Fox) investigan ahora la posible aplicación automatizada de esta técnica a los sitios Web programados con la Enterprise Edition 2 de Java, conocido marco para desarrollar programas en Internet.

El procedimiento más utilizado hoy para corregir los fallos de un sitio Web consiste en reiniciar el sistema entero. Puede que se tarde

REINICIACION SELECTIVA PARA ABREVIAR LAS INTERRUPCIONES



en ello diez segundos (si sólo se reinicia la aplicación), o un minuto si hay que arrancar de nuevo todo el conjunto. Según nuestros primeros resultados, la microrreiniciación de los componentes estrictamente necesarios dura menos de un segundo. El usuario ya no recibirá un mensaje de error, sino que notará una pausa de tres segundos, tras la cual se reanudará el servicio normal.

Identificación de problemas

Identificar errores imprevistos es un problema más difícil que corregir fallos conocidos o frecuentes. Los operadores de sistemas podrían valerse de ayudas para localizar los problemas con mayor rapidez, segundo de los principios guía de nuestro enfoque ROC

Al construir un sistema informático tradicional con una gran seguridad de funcionamiento, los programadores comienzan por una descripción completa de los componentes del equipo físico y los programas. Después trazan cuidadosamente un árbol de análisis de fallos que señale la multitud de procesos capaces de provocar la caída del sistema, a fin de evitarlos, o corregirlos en el caso de que se produzcan. En contraste con los sistemas de suministrador único, los servicios de Internet son heterogéneos y utilizan componentes de origen múltiple. Además, estos módulos suelen cambiar con frecuencia debido a la evolución del servicio. Muchas veces los fallos proceden de interacciones inesperadas entre los componentes, no de un defecto en determinado programa informático. Cuando se produce este tipo de fallo dinámico, el usuario que en ese momento pida acceso a un servicio de la Web puede recibir un mensaje de error.

Para facilitar el análisis de estas complejas anomalías, los alumnos de doctorado Emre Kiciman y Eugene Fratkin, de Stanford, y Mike Chen, de Berkeley, crearon PinPoint, un programa de tipo ROC que determina qué componentes fallan. Siempre que alguien visita un sitio Web dotado de PinPoint, el programa busca qué componentes de programación participan en prestar el servicio a ese usuario. Cuando fracasa una petición de acceso concreta —cuando, por ejemplo, el usuario recibe un mensaje de error desde el sitio—, PinPoint percibe que ha ocurrido tal cosa. A lo largo del tiempo analiza la combinación de componentes que se activaron tanto en peticiones atendidas como malogradas, para lo cual aplica procedimientos ordinarios de extracción de datos. De este modo va descubriendo los componentes sospechosos de producir la mayoría de los fallos. La información adicional que recoge el programa de análisis de fallos disminuye la velocidad del sistema en no más del 10 por ciento. A diferencia de la solución tradicional —que requiere una laboriosa planificación previa cada vez que se modifica la secuencia de programas—, PinPoint es compatible con cualquier combinación de componentes informáticos.

Eliminación de los errores

Quizá la mayor dificultad con que se tropieza a la hora de potenciar la fiabilidad de un sistema sea conseguir un margen de seguridad contra los errores aleatorios que introducen los operadores; éste es el fundamento de nuestro tercer principio ROC, relativo a la instrucción "deshacer". Los procesadores de textos primitivos no poseían tal capacidad, lo que hacía irritante e incluso temible su manejo. Una sola sustitución general podía destruir un fichero completo. La función deshacer confirió al usuario la facultad de cancelar cualquier instrucción y, por tanto, libró de ansiedad al procesado de textos.

Los operadores de los grandes sistemas actuales no disponen de esa facultad. Cuando se sentaron las bases de la técnica informática, nadie consideró importante la capacidad de borrar los errores. Y ello fue debido a que la función deshacer requiere más trabajo, ocupa un espacio de almacenamiento considerable y probablemente disminuye algo la velocidad de procesamiento del sistema.

En busca de un mejor enfoque, nuestro grupo trabaja en dotar de la capacidad de "deshacer" a los sistemas de correo electrónico, en concreto al punto donde se almacenan los mensajes. Aaron Brown, estudiante de doctorado en Berkeley, y uno de los autores (Patterson) han terminado hace poco el prototipo de un sistema de correo electrónico que ofrece al operador la facultad de deshacer lo hecho; está en pruebas en estos momentos (*véase el recuadro* "Volver atrás para resolver un problema").

Supongamos que un servidor ordinario donde se almacena correo electrónico es infectado por un virus. El operador debe desinfectar el sistema, tarea laboriosa. Nuestro dispositivo, en cambio, habrá registrado automáticamente todas las actividades del servidor, incluso los mensajes eliminados. Si el sistema se ve infectado, el operador podrá emplear el comando "deshacer" para "atrasar el reloj" hasta el momento anterior a la llegada del virus, y a continuación cargar programas que ataquen dicho virus. Por último, el operador repetirá los pasos correspondientes a los mensajes creados después de la infección; el sistema recuperará su funcionamiento normal. El programa antivirus recién instalado filtrará el tráfico de correo electrónico posterior. De esta manera, el operador puede reparar el daño sin perder mensajes importantes. Para evitar posibles confusiones entre los usuarios —que podrían notar la falta de algunos mensajes de correo electrónico—, el sistema enviaría un mensaje señalando que tales supresiones se realizaron para detener la propagación del virus.

Inyección de errores experimentales

El último de los principios ROC dice que los errores pueden aprovecharse para un buen fin: recomendamos que se realicen pruebas periódicas del sistema mediante la inserción de errores artificiales. Esta práctica ayudaría a evaluar la

PARA ASEGURAR EL FUNCIONAMIENTO

Los sistemas de computación y sus "órganos" —microprocesadores, aplicaciones y redes de comunicación— adquieren de día en día más potencia. Pero al mismo tiempo aumenta su complejidad y vulnerabilidad a los fallos. Se incrementan a su vez los gastos de administración y vigilancia y las pérdidas por las interrupciones de servicio. Interesa, pues, asegurar el funcionamiento de los productos informáticos. Es significativo que muchas de las decisiones adoptadas se orienten a suprimir en todo lo posible las intervenciones humanas (y los errores que inevitablemente crean).

De tal manera han preocupado a la dirección de Microsoft los fallos de seguridad, los errores de programación y otras deficiencias de su línea de productos actual, que hace poco suspendió durante todo un mes —una decisión muy poco corriente— sus labores de programación para concentrarse en lo que denominan Trustworthy Computing (computación digna de confianza). La seguridad de funcionamiento ha ido siendo tanto más crucial cuanto mayor ha ido siendo el número de administradores que han adoptado el sistema operativo Windows para los servidores de la Red. Los expertos en sistemas operativos de Microsoft han recibido cursillos sobre el diseño de sistemas operativos más seguros y fiables para los ordenadores personales. Están ahora refinando Windows; la nueva versión se llamará Palladium. Quieren eliminar los posibles puntos débiles de los productos actuales, a la par que se desarrollan características nuevas que fortalezcan las defensas contra el pirateo informático.



Se ha investigado poco cómo podría reducirse el coste de poseer un ordenador a lo largo de su vida útil —el precio adicional que han de pagar individuos y empresas por utilizar los sistemas que han comprado—. Programadores de Hewlett-Packard Laboratories e IBM Research intentan reducirlo mediante la incorporación de nuevas capacidades y el desarrollo de productos que se autogestionan. Hewlett-Packard piensa en un sistema de recursos de procesamiento y memoria, interconectados en una red mundial, que se vigilen, reparen y adapten por sí mismos, sin intervención de operadores. Su proyecto de Computación Planetaria se centra en la creación de centros de datos empresariales que contengan hasta 50.000 ordenadores, diez veces más que sus equivalentes actuales.

El plan de IBM toma ideas de la teoría de control (la estabilización de sistemas que funcionan en bucle cerrado por medio de la realimentación) y de la inteligencia artificial (la imitación, o captación de una u otra forma, de destrezas humanas para resolver problemas complejos) con el objeto de crear centros de datos que diagnostiquen sus propios problemas, ajusten su configuración para acomodarse a los cambios solicitados, se autorreparen y se defiendan contra los ataques de los piratas informáticos. Por analogía con el sistema nervioso autónomo del cuerpo humano, IBM denomina a esta meta Computación Autónoma.

Muchas veces se ha intentado prescindir de la intervención humana en los sistemas de ingeniería propensos a sufrir los errores de los operadores. Tal empeño, sin embargo, puede caer en una trampa bien conocida: la paradoja de la automatización. Al no poder suprimir por completo la necesidad de actuaciones humanas, los diseñadores suelen automatizar las tareas sencillas y reservan para la ejecución manual las complicadas, lo cual suele empeorar la situación. Los administradores deben realizar de vez en cuando tareas difíciles en sistemas que no les son familiares, camino que fatalmente termina en fallo.

Sólo el tiempo dirá si puede conseguirse una computación de verdad fiable incrementando la automatización o si, por el contrario, habrá de combinarse un diseño más depurado con herramientas que aumenten en gran medida la eficacia y la productividad de los operadores humanos.

SAMUEL VELASCO

eficacia con que se recupera el sistema y a encontrar nuevos métodos que aumenten su solidez. Compárese con los circuitos que regularmente se agregan a los microprocesadores para simplificar las pruebas, aun cuando su incorporación aumente el tamaño de las pastillas y no se vuelvan a utilizar una vez han salido de la fábrica. Se considera que estos circuitos de prueba merecen el esfuerzo invertido: con ellos se garantiza a un menor coste que los microprocesadores terminados funcionen como se había previsto. Parte de las ventajas proviene de que esos circuitos permiten inyectar artificialmente "fallos" durante el diseño con miras a comprobar que el microcircuito los detecta y se recupera de ellos como es debido.

Nuestro grupo propone unos programas con una finalidad equivalente. Cuando los operadores sigan la táctica de reiniciación selectiva, los errores experimentales ayudarán a determinar los componentes de programación que han de iniciarse de nuevo para combatir un tipo particular de fallo. Si el problema se hubiese propagado a uno o dos componentes más, podrían reiniciarse éstos; pero si el número de elementos afectados fuese mayor, sería aconsejable reiniciar el sistema entero. Hemos empezado por aplicar la inyección de errores para observar las características de propagación en los sitios Internet construidos con la Enterprise Edition 2 de Java.

Existe otra versión de estos programas de inyección de errores que permitiría a posibles compradores de un sistema informático evaluar cómo gestiona éste un fallo. La aplicación Fig, elaborada por los estudiantes de doctorado de Berkeley Pete Broadwell, Naveen Sastry y Jonathan Traupman, prueba la capacidad de los programas de tratar adecuadamente errores inesperados en la biblioteca C normalizada, una parte del sistema operativo que utilizan casi todos los programas informáticos. "Fig" es acrónimo de "Fault injection in *glibc*" (Inyección de fallos en *glibc*, una versión de la biblioteca C normalizada empleada por numerosos programadores).

Mediante la inyección de errores los programadores podrían además probar sus mecanismos de repara-

VOLVER ATRAS PARA RESOLVER UN PROBLEMA

OPERADOR HUMANO
DESTINATARIO PREVISTO DEL MENSAJE
Servidor de correo electrónico
Módulo deshacer
Registros Deshacer/ Rehacer
EXPEDIDOR INFECTADO
VIRUS

1 INDICACION DE HORA: Un usuario de correo electrónico envía a un amigo un mensaje contaminado con virus. El operador humano del sistema no puede proteger al servidor de un virus que no se ha detectado. Pero el módulo "deshacer" observa y registra todos los mensajes que entran y salen (entre ellos el infectado), y puede corregir este género de problemas tan pronto como aparezca.

¡Deshacer!

2 REPLIEGUE: El operador se entera de que un nuevo virus circula por la red y teme que el servidor pueda infectarse. Por suerte, el mensaje infectado aún no se ha enviado al destinatario. El operador ordena al módulo "deshacer" que utilice los datos de su registro "deshacer/rehacer" para "no entregar" los mensajes recibidos desde la aparición del virus. Seguidamente instala un filtro antivirus.

3 REANUDACION: El operador ordena ahora al módulo "deshacer" que "rehaga" las acciones que había deshecho, con lo que los mensajes vuelven a ser entregados al servidor de correo electrónico. Esta vez, sin embargo, el nuevo filtro antivirus intercepta y elimina el mensaje infectado, de lo cual recibe aviso el destinatario del mensaje.

¡Rehacer!
FILTRO DE VIRUS
"Se le ha suprimido un mensaje de correo electrónico infectado para protegerle del virus"

SAMUEL VELASCO

ción, lo cual no es nada fácil. "Fig" les permitiría hacer prácticas de diagnóstico y reparación de fallos, tal vez en un sistema experimental pequeño en vez de en la instalación real. El programa se ha utilizado ya varias veces y se ofrece gratuitamente en nuestro sitio ROC de la Telaraña mundial.

Recuperación calibrada

La historia de la industria informática fortalece nuestra fe en la importancia de la medición y difusión del progreso técnico. Cuando las grandes firmas terminaron por adoptar (con muchos años de retraso) programas de calibración normalizados para comparar calidades de funcionamiento, los clientes pudieron al fin apreciar con claridad las ventajas relativas de cada producto. Las empresas que iban a la zaga técnicamente se vieron obligadas a invertir más en ingeniería; evaluaban luego el efecto de sus innovaciones gracias a las calibraciones normalizadas. Los datos obtenidos de las pruebas condujeron a una incesante cascada de mejoras de la calidad.

Para evaluar el tiempo de recuperación, los alumnos de doctorado Brown y David Oppenheimer, junto con Patterson, aspiran a reproducir ese tipo de competición, sólo que ahora referida a la fiabilidad de los sistemas informáticos. Los productos que se recuperen de las caídas en menos tiempo, tal y como demuestre la calibración, se venderán mucho mejor. Imaginemos una secuencia de pruebas en la que se introduzcan fallos comunes, generados por los operadores, el equipo físico o la programación. Los posibles compradores podrían insertar esas faltas en los sistemas y observar el tiempo que tardan en recuperarse. Cabe destacar que la publicidad de ordenadores airea más la disponibilidad (el porcentaje de tiempo que se va en interrupciones), mucho más difícil de medir que el tiempo de recuperación.

Cuando científicos e ingenieros concentran sus esfuerzos, consiguen asombrosos progresos en un plazo bastante corto. Así lo demuestra el imparable avance de las prestaciones, y de las prestaciones por euro, de los ordenadores en los últimos 30 años. Si la industria sigue corriendo a ciegas por el camino que ahora está siguiendo, en 2023 los ordenadores funcionarán diez mil veces más deprisa que las máquinas actuales, aunque no con mayor seguridad de funcionamiento. Pero con las herramientas y medidas de calibración que nos ofrece la informática para fortalecer y medir la seguridad de funcionamiento, la computación llegará un día a ser tan fiable como desean los usuarios.

Bibliografía complementaria

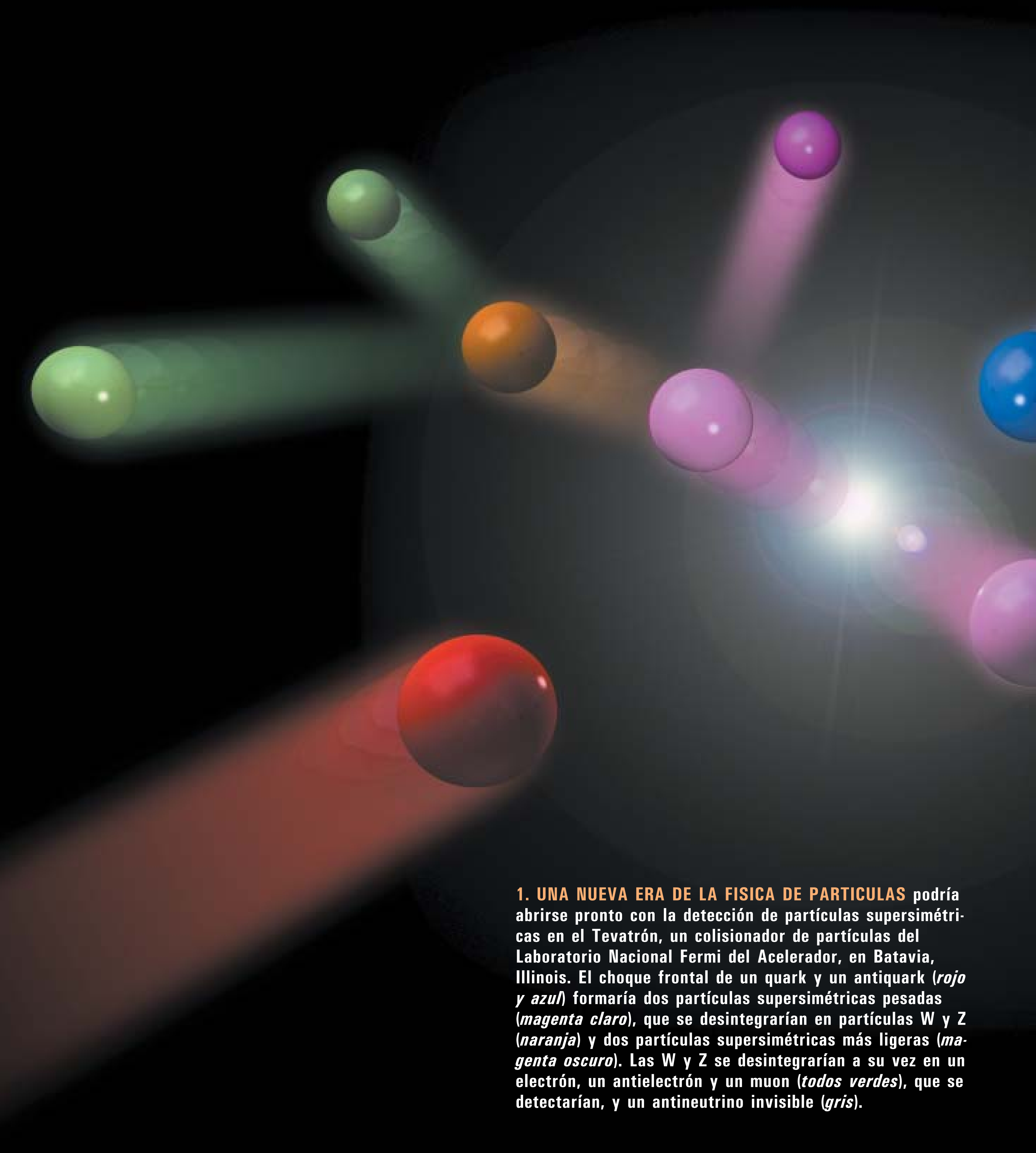
TO ENGINEER IS HUMAN: THE ROLE OF FAILURE IN SUCCESSFUL DESIGN. H. Petroski. Vintage Books, 1992.

THE MYTHICAL MAN-MONTH: ESSAYS ON SOFTWARE ENGINEERING. Segunda edición. Frederick P. Brooks. Addison-Wesley, 1995.

MANAGING THE RISKS OF ORGANIZATIONAL ACCIDENTS. James Reason. Ashgate Publishing Company, 1997.

TURING. Christos Papadimitriou. MIT Press (en prensa).

Más allá del modelo



1. UNA NUEVA ERA DE LA FISICA DE PARTICULAS podría abrirse pronto con la detección de partículas supersimétricas en el Tevatrón, un colisionador de partículas del Laboratorio Nacional Fermi del Acelerador, en Batavia, Illinois. El choque frontal de un quark y un antiquark (*rojo y azul*) formaría dos partículas supersimétricas pesadas (*magenta claro*), que se desintegrarían en partículas W y Z (*naranja*) y dos partículas supersimétricas más ligeras (*magenta oscuro*). Las W y Z se desintegrarían a su vez en un electrón, un antielectrón y un muon (*todos verdes*), que se detectarían, y un antineutrino invisible (*gris*).

estándar de la física

El modelo estándar de la física de partículas está en un momento crucial de su historia: se halla, al tiempo, en la cumbre de sus éxitos y a punto de ser superado

Gordon Kane



BRYAN CHRISTIE DESIGN

Hoy en día, tras siglos de búsqueda de los componentes elementales que construyen la complejidad y belleza del mundo, tenemos una respuesta de asombrosa sencillez. Sólo se necesitan seis partículas: el electrón, los quarks arriba y abajo, el gluon, el fotón y el bosón de Higgs. Once partículas adicionales bastan para describir los raros fenómenos que estudian los físicos de partículas (*véase el* recuadro "El modelo estándar"). No se trata de una especulación parecida a la de los antiguos griegos, con sus cuatro elementos, la tierra, el aire, el agua y el fuego. Por el contrario, se trata de una conclusión contenida en la teoría matemática de la naturaleza más refinada que haya habido, el modelo estándar de la física de partículas. A pesar de la palabra "modelo", se trata de una teoría completa que identifica las partículas básicas y especifica sus interacciones. Todo lo que sucede en nuestro mundo (salvo los efectos de la gravedad) se deduce de las interacciones entre las partículas del modelo estándar, según sus reglas y ecuaciones.

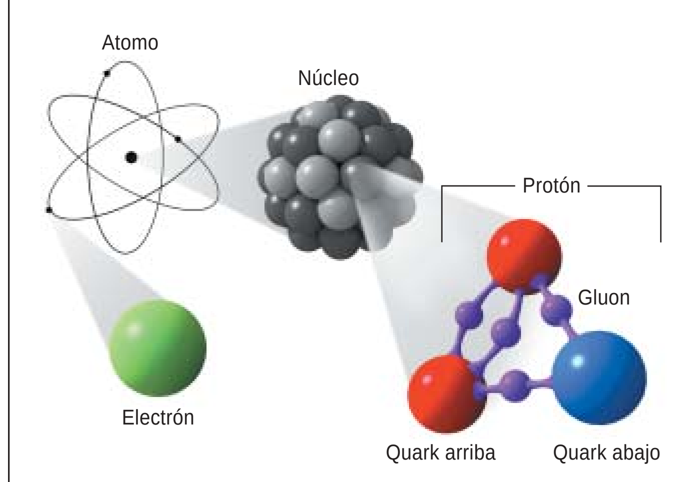
El modelo estándar se formuló en el decenio de 1970. Los experimentos lo habían ratificado ya, de manera aún provisional, a principios de la década siguiente. Casi treinta años de precisos experimentos han puesto a prueba y verificado los detalles de la teoría con meticulosidad; se han confirmado todas sus predicciones. Por un lado es alentador, ya que confirma que en verdad entendemos, con mayor profundidad que nunca, el funcionamiento de la naturaleza. Paradójicamente, se trata de un éxito frustrante. Con anterioridad al modelo estándar, los físicos se habían acostumbrado a que los experimentos produjeran nuevas e inesperadas partículas, o cualquier otra indicación de que apuntaba una nueva teoría casi antes de que se hubiese secado la tinta con que se había escrito la última. Treinta años llevan esperando a que le suceda lo propio al modelo estándar.

Esta espera debería acabar pronto. Algunos experimentos que lograrán colisiones de energías más altas que nunca, o que estudian ciertos fenómenos clave con mayor precisión, están a punto de llevarnos más allá del modelo estándar. Los resultados no refutarán

Resumen/*Una nueva era*

- Aunque no hay teoría de la naturaleza que haya obtenido más éxitos que el modelo estándar de la física de partículas, cada vez abundan más las señales de que debe ampliarse con nuevas partículas, que participarían en las reacciones a altas energías.
- Los principales experimentos están a punto de proporcionar pruebas directas de las nuevas partículas. Después de 30 años de consolidación, la física de partículas va a entrar en una nueva era de descubrimientos.
- Falta también por observar un elemento del modelo estándar, una partícula, el bosón de Higgs. El Tevatrón, un colisionador del Fermilab, podría detectarlo en los próximos años.

EL MODELO ESTANDAR



Las partículas

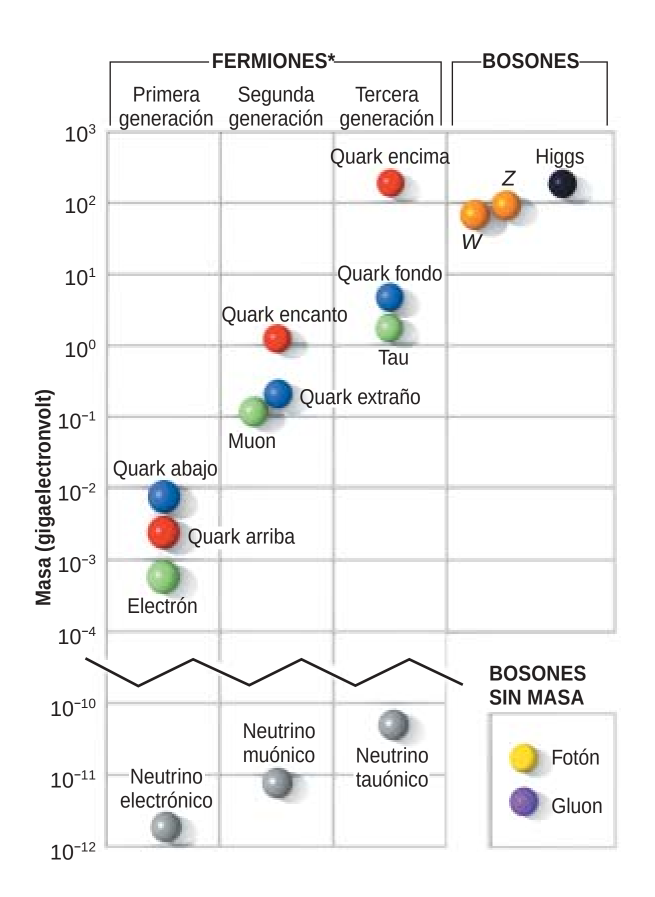
AUNQUE EL MODELO ESTANDAR necesita una ampliación, sus partículas bastan para describir el mundo (con excepción de la gravedad) y casi todos los datos recogidos por los físicos de partículas.

PARTICULAS DE MATERIA (FERMIONES) En el modelo estándar, las partículas fundamentales de la materia ordinaria son el electrón, el quark arriba (u) y el quark abajo (d). Tripletes de quarks se unen para formar protones (uud) y neutrones (udd), que a su vez constituyen los núcleos atómicos (*arriba*). El electrón y los quarks arriba y abajo, junto con el neutrino electrónico, forman el primero de tres grupos de partículas, o generaciones. Las generaciones son idénticas en todos los aspectos, excepto en las masas de las partículas. Los valores atribuidos a las masas de los neutrinos en el recuadro son conjeturales; se han elegido de manera que sean compatibles con las observaciones.

TRANSMISORES DE FUERZAS (BOSONES) El modelo estándar describe tres de las cuatro fuerzas conocidas: el electromagnetismo, la fuerza débil (que participa en la formación de los elementos químicos) y la fuerza fuerte (que mantiene unidos los protones, neutrones y núcleos). Las fuerzas actúan mediante las partículas transmisoras: los fotones para el electromagnetismo, los bosones W y Z para la fuerza débil, los gluones para la fuerza fuerte. Los gravitones generarían la gravedad, pero el modelo estándar no abarca esta fuerza; sólo unifica parcialmente las fuerzas electromagnética y débil: a altas energías, o, dicho de manera equivalente, a distancias menores que el diámetro de los protones, constituyen sólo aspectos de una fuerza "electrodébil". Uno de los mayores éxitos del modelo estándar estriba en que determine la estructura detallada de las ecuaciones que describen las fuerzas, no de una manera *ad hoc* que sólo pretenda ajustarse a un conjunto de datos empíricos, sino por medio de principios generales contenidos en la propia teoría. Para el electromagnetismo, por ejemplo, la validez de la teoría de campos cuánticos relativistas (en la que se basa el modelo estándar) y la existencia del electrón implican que debe existir el fotón e interaccionar tal y como lo hace; de esta manera, comprendemos por fin la luz. Argumentos similares predijeron la existencia y las propiedades, después confirmadas, de los gluones y de las partículas W y Z.

LA FUENTE DE LA MASA Además de las partículas descritas más arriba, el modelo estándar predice la existencia del bosón de Higgs, que aún no ha sido detectado directamente por los experimentos. Interacciona con las demás partículas y las dota de masa.

¿NIVELES MAS PROFUNDOS? ¿Podría quedar superado el modelo estándar por una teoría donde los quarks y los electrones constaran de partículas más fundamentales? Casi seguro que no. Aunque nunca han sondeado los experimentos con mayor profundidad, no se ha encontrado rastro alguno de estructura adicional. Más aún: el modelo estándar, una teoría bien trabada, sólo tiene sentido si los electrones y los quarks son fundamentales. No hay cabos sueltos que apunten a una estructura más profunda. Además, las fuerzas tienden a igualarse a altas energías, en particular si damos por real la supersimetría. Si los electrones y los quarks se componen de otras partículas, esta unificación fallaría: las fuerzas no se igualarían. Para la teoría de campos cuánticos relativistas, los electrones y los quarks son puntuales: carecen de estructura. Quizás haya que considerarlos pequeñas cuerdas o membranas (como en la teoría de cuerdas), pero seguirían siendo electrones y quarks, con todas las propiedades conocidas que el modelo estándar les otorga a estos objetos a bajas energías.



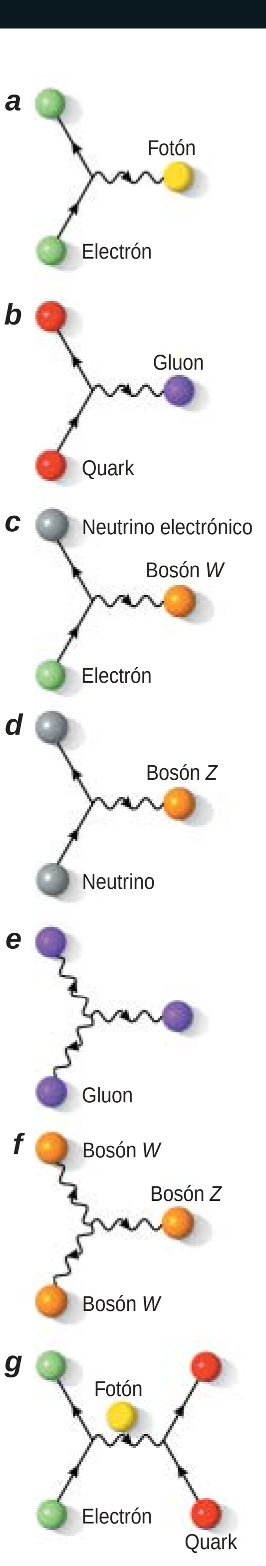
*Los fermiones se subdividen en quarks y leptones; los leptones incluyen electrones, muones, taus y tres formas de neutrinos.

Las reglas del juego

EL MODELO ESTANDAR describe las partículas fundamentales y sus interacciones. Para un pleno conocimiento de la naturaleza, hemos también de saber qué reglas deben aplicarse para calcular los resultados de las interacciones. Un ejemplo que ayuda a elucidar este punto es la ley de Newton, $F = ma$. F es cualquier fuerza, m la masa de una partícula y a la aceleración de la partícula inducida por la fuerza. Incluso aunque se conozcan las partículas que intervienen y las fuerzas que actúan sobre ellas, no se podrá calcular el efecto de éstas en aquéllas a menos que se sepa la regla $F = ma$. La versión moderna de las reglas es la teoría de campos cuánticos relativistas, concebida en la primera mitad del siglo XX. En la segunda mitad del siglo XX, el modelo estándar informó acerca de la naturaleza de las partículas y las fuerzas que actuaban conforme las reglas de la teoría de campos cuánticos. El propio concepto clásico de fuerza también se amplió en el modelo estándar: las partículas no sólo se atraen y repelen; en sus interacciones, cambian de identidad o se crean y destruyen.

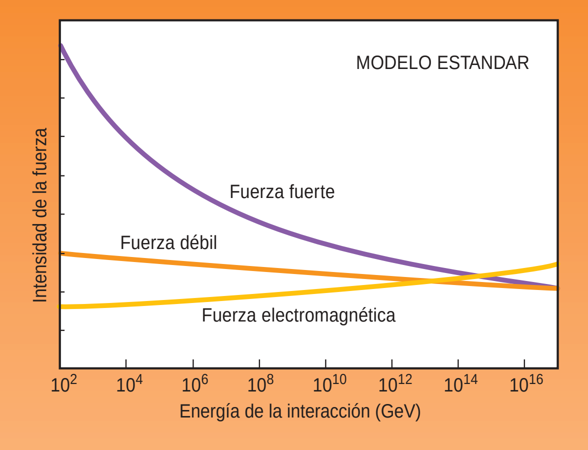
Los diagramas de Feynman (*a-g, a la derecha*), ideados por el físico Richard P. Feynman, sirven de útil abreviación cuando hay que detallar las interacciones en la teoría de campos cuánticos. Las líneas rectas representan las trayectorias de las partículas de materia; las onduladas representan las de las partículas de las fuerzas. La emisión o absorción de fotones por cualquier partícula cargada, un electrón o un quark, produce el electromagnetismo. En *a*, el electrón entrante emite un fotón y sale en una nueva dirección. La fuerza fuerte se debe a la emisión o absorción por quarks de gluones (*b*). En la fuerza débil, tanto quarks como leptones (electrones, muones, taus y neutrinos) emiten y absorben partículas W y Z (*c, d*). Obsérvese cómo W modifica la identidad del electrón. Los gluones (*e*) y las W y Z (*f*) también interactúan, pero los fotones no.

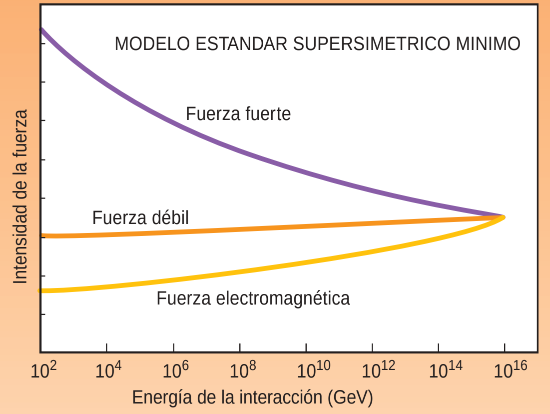
Estos diagramas, del *a* al *f*, reciben el nombre de vértices de interacción. Las fuerzas se producen al combinar dos o más vértices. Por ejemplo, la fuerza electromagnética entre un electrón y un quark está generada sobre todo por la transferencia de un fotón (*g*). Lo que suceda a nuestro alrededor, con excepción de la gravedad, es el resultado de combinaciones de estos vértices.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

Indicios de la supersimetría





LA TEORIA PREFERIDA para superar el modelo estándar es el modelo estándar supersimétrico mínimo. En él, cada especie de partícula conocida tiene una partícula supercompañera emparejada con ella a través de la supersimetría. Las partículas se agrupan en dos grandes clases: los bosones (como las partículas de las fuerzas), que se pueden agrupar en el mismo estado, y los fermiones (como los quarks y los leptones), que evitan hallarse en estados idénticos. El supercompañero de un fermión es siempre un bosón, y viceversa.

Un indicio indirecto de la existencia de la supersimetría proviene de la extrapolación de las interacciones a altas energías. En el modelo estándar, las tres fuerzas acaban por parecerse, pero sin llegar a ser iguales, en intensidad (*arriba*). La existencia de supercompañeras cambia la extrapolación de manera que todas las fuerzas coinciden a cierta energía (*abajo*), lo que da a entender que, si la supersimetría es real, se unifican.

NINA FINKEL

dicha teoría, sino que ensancharán sus límites con el descubrimiento de partículas y fuerzas que no describe. El experimento más importante se desarrolla en el remozado colisionador Tevatrón, del Laboratorio Nacional Fermi del Acelerador (Fermilab), en Batavia, Illinois, que empezó a tomar datos en el año 2001. Podrá crear directamente la partícula que completa el modelo estándar y aún no ha sido encontrada (el bosón de Higgs), así como las predichas por las más atractivas extensiones de la teoría (las “supercompañeras” de las partículas conocidas).

También empiezan a aportar información significativa las “fábricas de B”, unos colisionadores de partículas, que se hallan en California y Japón, configurados para crear miles de millones de quarks b (una de las 11 partículas adicionales) y sus versiones equivalentes de antimateria. Estudiarán un fenómeno concreto, la violación de CP. La simetría CP (carga-paridad) relaciona la materia con la antimateria; su violación tiene por consecuencia que la antimateria no se comporte exactamente como la imagen especular de la materia. La cantidad de violación de CP observada hasta ahora en las desintegraciones de partículas es compatible con el modelo estándar, pero hay razones para esperar que su magnitud sea mucho mayor que la admisible en él. La física de más allá del modelo estándar puede generar un grado de violación de CP adicional.

Se están estudiando también con detalle las propiedades eléctricas y magnéticas de las partículas. El modelo estándar predice que los electrones y los quarks actúan como imanes microscópicos de una determinada intensidad cuyo comportamiento en un campo eléctrico viene determinado sólo por su carga eléctrica. La mayoría de las extensiones del modelo estándar predicen una intensidad magnética y un comportamiento eléctrico un poco diferentes. Los experimentos empiezan a recoger datos con suficiente precisión como para descubrir los pequeños efectos predichos.

Se ha establecido hace poco que los neutrinos, partículas que apenas interaccionan, tienen masa, tanto los que vienen del Sol como los que nos llegan de los rayos cósmicos. Esperaban desde hacía tiempo este resultado los teóricos que estudian las ampliaciones del modelo estándar [*véase* “La resolución del problema de los neutrinos solares”, por Arthur B. McDonald, Joshua R. Klein y David L. Wark; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio 2003]. La próxima ronda de experimentos dejará claro qué forma tendrá que tomar la teoría para explicar las masas observadas de los neutrinos.

Además, hay experimentos en marcha que se proponen detectar las misteriosas partículas que forman la materia oscura fría del universo y examinar los protones con unos mayores niveles de precisión que permitan averiguar si se desintegran. El éxito de cualquiera de estos proyectos representará un hito de la física de más allá del modelo estándar.

A medida que avanzan estas investigaciones, se va entrando en una nueva era, muy rica en datos, de la física de partículas. Hacia el año 2007 se contará con el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), una máquina de 27 kilómetros de circunferencia que se construye en el CERN, el Laboratorio Europeo de Física de Partículas, cerca de Ginebra [*véase* “El gran colisionador de hadrones”, por Chris Llewellyn Smith; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre 2000]. Se está ahora diseñando un colisionador lineal de electrones y positrones de 30 kilómetros de largo que complementará los resultados del LHC.

En cuanto se vislumbra algún primer resultado que no encaja en el modelo estándar, a menudo corre la nueva de que se ha descubierto que el modelo es erróneo, que se resquebraja y pronto quedará descartado. No debe interpretarse así lo que está sucediendo. Tomemos el ejemplo de las ecuaciones de Maxwell, formuladas avanzado el siglo XIX para describir la fuerza electromagnética. A comienzos del siglo XX se vio que, a

escalas atómicas, se necesitaba una versión cuántica de las ecuaciones de Maxwell. Más adelante, el modelo estándar incluyó estas ecuaciones de Maxwell cuánticas como un subconjunto de sus ecuaciones. En ningún caso decimos que las ecuaciones de Maxwell estén equivocadas. Se va generalizando su alcance. (Y aún se usan para diseñar innumerables técnicas electrónicas.)

Un edificio permanente

De manera parecida, el modelo estándar permanecerá. Es una teoría matemática completa, un edificio muy estable, con múltiples interconexiones. Se convertirá en una pieza de un edificio mayor, pero no puede estar "equivocado." Ninguna parte de la teoría puede fallar sin que se hunda toda la estructura. Si la teoría fuese errónea, las comprobaciones exitosas tendrían que deberse a meros accidentes. Seguirá describiendo las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas a bajas energías.

Se ha corroborado muy bien el modelo estándar. Predijo la existencia de los bosones W y Z, de los gluones y de dos de los quarks de mayor masa (los quarks encanto y cima). Todas estas partículas se descubrieron más tarde; sus propiedades coincidían con las predichas.

Una segunda comprobación de peso fue la del ángulo de mezcla electrodébil, un parámetro que desempeña una función en la descripción de las interacciones débiles y electromagnéticas. Debe tener el mismo valor para cada proceso electrodébil. Si el modelo estándar fuese falso, podría tomar un valor diferente para cada proceso; se observa, en cambio, que presenta el mismo valor en todas partes, con una precisión de alrededor de un 1 por ciento.

En tercer lugar, el Gran Colisionador de Electrones y Positrones (LEP) del CERN, que funcionó de 1989 hasta 2000, observó unos 20 millones de bosones Z. A todos los efectos, cada uno de ellos se desintegró de acuerdo con lo previsto por el modelo estándar, que predice el número de casos de cada clase de desintegración, así como los detalles acerca de las energías y direcciones de las partículas salientes. Estas corroboraciones no son más que unas pocas de entre las muchas que han confirmado con solidez el modelo estándar.

En todo su esplendor, el modelo estándar incluye 17 partículas y un número similar de parámetros libres —masas de partículas e intensidades de interacciones (*véase el recuadro* "El modelo estándar")—. Los parámetros pueden adquirir, en principio, cualquier valor; si sabemos sus valores correctos es porque los hemos medido. Los críticos de salón algunas veces comparan los muchos parámetros del modelo estándar con los epiciclos sobre epiciclos que los teóricos medievales usaban para describir las órbitas planetarias. Imaginan que el modelo estándar tiene un poder predictivo limitado, que su contenido es arbitrario o que puede explicar cualquier cosa mediante el ajuste de algún parámetro.

Nada más falso: una vez se han medido las masas y las intensidades de las interacciones en algún proceso, quedan fijadas en toda la teoría y para cualquier otro experimento, sin dejar ningún tipo de libertad. Además, la teoría determina la forma precisa de las ecuaciones del modelo estándar. Se han medido todos los parámetros, excepto la masa del bosón de Higgs. Mientras no trascendamos el modelo estándar, los nuevos resultados no cambiarán más que la precisión con que conocemos los parámetros. Y, a medida que mejore, no resultará más fácil que los datos experimentales sigan sin contradecirse. Muy al contrario, puesto que las cantidades medidas deberán concordar dentro de unos niveles de precisión más exigentes, resultará cada vez más difícil.

Con la adición de nuevas partículas e interacciones en la ampliación del modelo estándar, podría parecer que se cuenta con mayor libertad, pero no tiene por qué ser así. La extensión más aceptada es el modelo estándar supersimétrico mínimo (MSSM). La supersimetría asigna una partícula supercompañera a cada especie de partícula. Sabemos poco acerca de las masas de las supercompañeras, pero la supersimetría restringe mucho sus interacciones. Una vez se hayan medido las masas, las predicciones experimentales del MSSM sufrirán, en razón de las relaciones matemáticas de la supersimetría, restricciones aún más fuertes que en el modelo estándar.

Diez misterios

Si el modelo estándar funciona tan bien, ¿por qué hay que ampliarlo? Existe un motivo sólido: unificar las fuerzas de la naturaleza. En el modelo estándar podemos extrapolar las fuerzas y preguntarnos cuál sería su naturaleza a energías mucho más elevadas. Por ejemplo, ¿cómo eran las fuerzas a las temperaturas altísimas imperantes poco después de la gran explosión? A bajas energías, la interacción fuerte es unas 30 veces más intensa que la débil y centuplica con creces la del electromagnetismo. Cuando extrapolamos, encontramos que las intensidades de estas tres fuerzas se acercan mucho, pero nunca llegan a ser exactamente iguales. Si ampliamos el modelo estándar como dicta el MSSM, a una determinada energía, muy elevada, las fuerzas acaban por ser idénticas (*véase el recuadro* "Indicios de la supersimetría"). Aún más, la fuerza gravitatoria viene a tener la misma intensidad que las otras a una energía un poco mayor, así que da la impresión de que existe una conexión entre las fuerzas del modelo estándar y la gravedad. Estos resultados parecen potentes indicaciones en favor del MSSM.

Pero, además, el modelo estándar no explica todos los fenómenos; los hay que ni siquiera pueden enunciarse en su seno:

El autor

GORDON KANE, físico teórico de partículas, ocupa la cátedra Victor Weisskopf de la Universidad de Michigan, en Ann Arbor. Sus trabajos exploran las maneras de comprobar y ampliar el modelo estándar de la física de partículas. En especial, estudia la física del bosón de Higgs y la extensión supersimétrica del modelo.

1. De nuestras teorías actuales parece desprenderse que el universo contiene una inmensa concentración de energía, incluso en las regiones más vacías del espacio. Los efectos gravitatorios de esta energía del vacío deberían haber curvado el universo hace ya mucho, o haberlo expandido hasta un tamaño mucho mayor que el actual. El modelo estándar no nos ayuda a resolver semejante paradoja, que se conoce como el "problema de la constante cosmológica".

2. Desde hace tiempo se creía que la expansión del universo se estaba frenando a causa de la mutua atracción gravitacional de la materia. Ahora sabemos que se está acelerando y que, sea cual sea la causa de la aceleración (la "energía oscura"), no halla explicación en el marco del modelo estándar.

3. En la primera fracción de segundo después de la gran explosión el universo pasó por una etapa de expansión rapidísima, o inflación. Los campos que causan la inflación no pertenecen al modelo estándar.

4. Si el universo empezó en la gran explosión como una enorme erupción de energía, debería haber evolucionado de manera que contuviese partes iguales de materia y de antimateria (la simetría CP). Pero las estrellas y las nebulosas se componen de protones, neutrones y electrones, y no de sus antipartículas (sus equivalentes de antimateria). El modelo estándar no explica esta asimetría de la materia.

5. Alrededor de una cuarta parte del universo consiste en materia oscura fría invisible, que no puede estar formada por las partículas del modelo estándar.

6. En el modelo estándar, las interacciones con el campo de Higgs (asociado al bosón de Higgs) aportan la masa a las partículas. El modelo estándar no puede dar cuenta de las muy especiales formas que deben tomar las interacciones del Higgs.

7. Las correcciones cuánticas le atribuyen al bosón de Higgs una masa enorme, lo que a su vez lleva a que sean también enormes las masas de las demás partículas. Tal resultado no puede evitarse en el modelo estándar. Se crea así un espinoso problema conceptual.

8. El modelo estándar no puede incluir la gravedad, debido a que no tiene la misma estructura que las tres fuerzas restantes.

9. El modelo estándar no puede explicar los valores de las masas de los quarks y los leptones (entre los que se cuentan el electrón y los neutrinos).

10. El modelo estándar tiene tres "generaciones" de partículas. El mundo ordinario consta de partículas de la primera generación; dicha generación parece constituir una teoría coherente por sí misma. El modelo estándar describe las tres generaciones, pero no justifica por qué hay más de una.

Cuando digo, en esta lista de problemas pendientes, que el modelo estándar *no puede* explicar un determinado fenómeno, no quiero decir que la teoría aún no lo haya explicado, pero lo podría hacer algún día. El modelo estándar es una teoría sujeta a muchas restricciones; *nunca* podrá explicar los fenómenos de la lista anterior. Una de las razones por las que la extensión supersimétrica del modelo estándar gusta a muchos físicos estriba en que pueda abordar estos problemas, excepto el segundo y los tres últimos. La teoría de cuerdas (donde las partículas se representan como pequeños entes de una dimensión, no como objetos puntuales) se plantea las tres últimas [*véase* "La teoría M", por Michael J. Duff; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril 1998]. Los fenómenos que el modelo estándar no puede explicar dan las claves de la forma en que se ampliará.

No es sorprendente que haya cuestiones que el modelo estándar no pueda contestar. Cada teoría científica triunfante ha aumentado el número de cuestiones resueltas y ha dejado algunas sin responder. Ahora bien, aun cuando un conocimiento más hondo haya llevado a nuevas cuestiones que no se podían formular antes, el número de preguntas fundamentales sin resolver ha ido decreciendo.

Algunos de estos 10 problemas todavía pendientes ofrecen otra razón por la que la física de partículas entra en una nueva era. Ha quedado claro que muchos de los más profundos problemas de la cosmología hallan su solución en la física de partículas. Así, los dos campos se han fundido en la "cosmología de partículas". Sólo gracias a los estudios cosmológicos podemos saber que el universo está formado por materia (y no por antimateria), o que aproximadamente en una cuarta parte es materia oscura fría. La comprensión teórica de estos fenómenos deberá contar con una explicación de su aparición en la evolución del universo tras la gran explosión. Pero la cosmología sola no puede indicarnos qué partículas forman la materia oscura fría, cómo se genera realmente la asimetría de la materia o cuál es el origen de la inflación. Los fenómenos de mayor y de menor escala sólo se podrán entender conjuntados.

El bosón de Higgs

Los investigadores abordan estos problemas que caen más allá del modelo estándar, pero también han de completar todavía un aspecto esencial del mismo. Para conferir masa a los electrones, los quarks y los bosones W y Z, la teoría recurre al campo de Higgs, que aún no ha sido detectado directamente.

El Higgs es radicalmente distinto de cualquier otro campo. Para comprender el alcance de esta diferencia, pensemos en los campos electromagnéticos. Los generan las cargas eléctricas. Una región del espacio tiene la menor energía posible, cuando el campo electromagnético se anula en cada uno de sus puntos. En ausencia de partículas cargadas el campo nulo es el estado natural. El modelo estándar, sin embargo, requiere que la menor energía se dé cuando el campo de Higgs adquiera un determinado valor no nulo. En consecuencia, un campo de Higgs no nulo impregna el universo y las

partículas interaccionan siempre con este campo. La interacción les da su masa, su inercia.

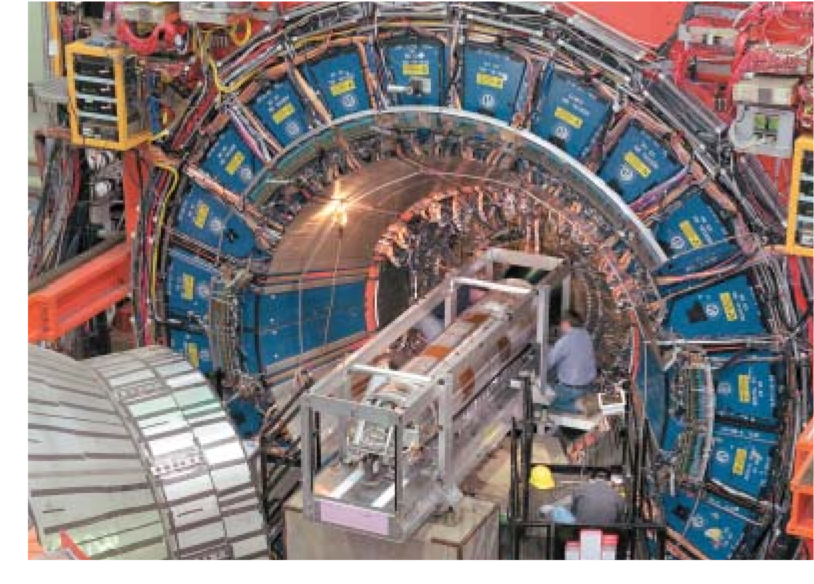
Asociado con el campo de Higgs está el bosón de Higgs. El modelo estándar no nos permite predecir, apoyados en unos primeros principios, la masa de las partículas, incluida la del propio bosón de Higgs. Sin embargo, sí se puede recurrir a otras magnitudes ya medidas para calcular algunas masas, como las de los bosones W y Z y del quark cima. Que tales predicciones se hayan confirmado avala la subyacente física del Higgs.

Algo sabemos sobre la masa del bosón de Higgs. Los experimentadores del colisionador LEP midieron unas 20 magnitudes relacionadas entre sí por el modelo estándar. Todos los parámetros necesarios para predecir sus valores están medidos ya, con excepción de la masa del bosón de Higgs. Cabe, por tanto, proceder al revés: partir de los datos y preguntarse qué masa del Higgs ajusta mejor esas 20 cantidades. Tiene que ser menor que unos 200 gigaelectronvolt (GeV). (La masa del protón es alrededor de 0,9 GeV; la del quark cima, 174 GeV.) El mero hecho de que haya una respuesta constituye un sólido indicio de la realidad del Higgs. Si no existiera y el modelo estándar estuviese equivocado, sería una notable coincidencia que las 20 magnitudes se interrelacionaran de manera tal que resulten compatibles con la presencia de un Higgs de masa determinada. Nuestra confianza en este procedimiento es aún mayor: un método similar predijo con mucha exactitud la masa del quark cima antes de que se lo hubiese detectado directamente.

El LEP también realizó una búsqueda directa de las partículas de Higgs, pero sólo pudo llegar hasta una masa de unos 115 GeV. En el mismo límite superior del alcance del LEP se observó un pequeño número de sucesos donde aparecían partículas que se comportaban como cabía esperar del bosón de Higgs. Pero no hubo suficientes datos como para estar seguros de que realmente se lo hubiera descubierto. En conjunto, los resultados sugieren que la masa del Higgs cae entre los 115 y los 200 GeV.

Se ha desmantelado el LEP para posibilitar la construcción del LHC, que empezará a tomar datos de aquí a cuatro años. Mientras, el Tevatrón del Fermilab sigue persiguiendo el Higgs. Si opera con la intensidad y la energía previstas, sin contratiempos, podría confirmar la existencia de un bosón de Higgs de 115 GeV en unos dos o tres años. Si el Higgs es más pesado, se tardará más tiempo en que una señal clara emerja del ruido de fondo. El Tevatrón generará más de 10.000 bosones de Higgs en total si funciona de acuerdo con lo proyectado; podría comprobar si cumplen lo predicho. El LHC será una "fábrica" de bosones de Higgs. Los producirá a millones; con él se emprenderán estudios más amplios.

También hay buenas razones para pensar que algunas de las partículas supercompañeras más ligeras predichas por el MSSM cuentan con masas tan pequeñas como para que también se creen en el Tevatrón. La confirmación directa de la supersimetría podría llegar en los próximos años. Parece probable que la supercompañera más ligera constituya la materia oscura fría del universo. Quizá se la observe en el Tevatrón. El LHC producirá, si existen, supercompañeras en abundancia; comprobará definitivamente si la supersimetría forma parte de la naturaleza.



FERMILAB PHOTO

2. GRACIAS A LA MEJORA de sus enormes detectores de partículas realizada entre 1996 y 2000, cabe dentro de lo posible que el Tevatrón llegue a observar el bosón de Higgs y la supersimetría.

Teorías efectivas

A fin de apreciar plenamente la relación del modelo estándar con el resto de la física y sus capacidades y sus limitaciones, viene bien tener en cuenta en qué consiste una teoría efectiva. Se trata de una descripción de un aspecto de la naturaleza que se vale de parámetros que, al menos en principio, cabe calcular por medio de una teoría más profunda. Por ejemplo, en la física nuclear se toman la masa, la carga y el espín del protón como parámetros. En el modelo estándar se pueden calcular tales magnitudes con las propiedades de quarks y gluones como parámetros. La física nuclear es una teoría efectiva de los núcleos; el modelo estándar, la teoría efectiva de los quarks y gluones.

Desde este punto de vista, no hay teoría efectiva cerrada. Tampoco, ninguna es más fundamental que otra. ¿Continuará la escala de teorías efectivas? El MSSM resuelve cierto número de problemas que no soluciona el modelo estándar, pero también es una teoría efectiva, tiene parámetros que podrían calcularse en teoría de cuerdas.

Bibliografía complementaria

THE RISE OF THE STANDARD MODEL: A HISTORY OF PARTICLE PHYSICS FROM 1964 TO 1979. Dirigido por Lillian Hoddeson, Laurie M. Brown, Michael Riordan y Max Dresden. Cambridge University Press, 1997.

THE LITTLE BOOK OF THE BIG BANG: A COSMIC PRIMER. Craig J. Hogan. Copernicus, 1998.

SUPERSYMMETRY: UNVEILING THE ULTIMATE LAWS OF NATURE. Gordon Kane. Perseus Publishing, 2001.

Por qué vemos lo que vemos

Una estrategia probabilística, basada en la experiencia previa, explica la notable diferencia entre lo que vemos y la realidad física

Dale Purves, R. Beau Lotto y Surajit Nundy

Las ilusiones ópticas resultan fascinantes. Lo que vemos —se considere por el brillo de los objetos, por sus colores o por su disposición en el espacio— se encuentra no pocas veces en discordancia con la realidad subyacente que miden fotómetros, espectrofotómetros o reglas graduadas. En el siglo XVIII, el filósofo irlandés George Berkeley proporcionó cierta inteligencia de estas discrepancias. En su "Ensayo hacia una nueva teoría de la visión", hizo notar que la estimación de la distancia, por ejemplo, no puede ser directamente deducida de la información geométrica de la imagen retiniana. En efecto, una línea dada de la imagen retiniana podría haber sido generada tanto por el borde de un objeto cercano de pequeño tamaño como por otro objeto más alejado, pero de mayor tamaño.

Toda la información de la retina sufre esta ambigüedad intrínseca. En el estímulo retiniano, la iluminación de los objetos y las propiedades físicas que determinan la cantidad y calidad de la luz que devuelven al ojo se funden en una unidad; así, el argumento general de Berkeley es aplicable a las sensaciones de brillo y color, amén de serlo a la percepción del espacio. En cada uno de estos aspectos fundamentales de la visión, la información contenida en la imagen de la retina no puede revelar directamente las auténticas fuentes de los estímulos procedentes del mundo físico. En consecuencia, la relación entre el mundo y nuestra percepción de él es, por naturaleza, de índole incierta.

Además de ofrecernos una idea de por qué lo que vemos quizá no esté siempre acorde con la realidad, este hecho fundamental de la visión presenta un dilema biológico. Es obvio que la supervivencia en un medio complejo, quizá hostil, depende de que se responda adecuadamente a la realidad física que subyace a las imágenes proyectadas sobre la retina. Por ejemplo, la confusión de un objeto pequeño y cercano con otro mayor, pero más distante, podría resultar catastrófica para el observador. Ahora bien, si la imagen de la retina no puede definir unívocamente la realidad a la que el observador ha de responder, ¿de qué modo logra el sistema visual generar una conducta que, por lo general, se enfrenta con éxito a un mundo que no puede aprehender directamente?

Como demostramos aquí, un conjunto de pruebas cada vez mayor indica que el sistema visual de los humanos —y presumiblemente el de muchos animales dotados de visión— resuelve el dilema de Berkeley mediante la generación de percepciones a partir de una base enteramente empírica. No se analizan los componentes de la imagen retiniana en cuanto tales; las percepciones se determinan de manera probabilística:

El autor

DALE PURVES ostenta la cátedra George Barth Geller de investigación en neurobiología. Enseña psicología y ciencias del cerebro en la Universidad Duke. R. Beau Lotto es profesor adjunto de oftalmología en el Colegio Universitario de Londres. Surajit Nundy realiza estudios de posgrado en neurobiología en la Universidad Duke.



1. A MENUDO, LO PERCIBIDO DISCREPA de las propiedades medidas en los objetos de una escena. En esta imagen, por ejemplo, la loseta blanca situada en la sombra de la mesa parece más brillante que la loseta gris situada a su derecha, a pesar de que son físicamente idénticas. Este artículo indica la razón de que se produzcan tales discrepancias, en apariencia una mala adaptación, entre lo percibido y la realidad.

gracias a la retroalimentación de los resultados de conductas guiadas por la vista en experiencias anteriores se va mejorando progresivamente el rendimiento, habida cuenta de la inevitable incertidumbre de la información retiniana. El resultado de este proceso, y sin duda la prueba de que existe, es la discrepancia entre lo que percibimos y las características del estímulo de la retina o las propiedades de los objetos subyacentes; concuerda, en cambio, con los significados típicos que iguales o parecidos estímulos han tenido, tanto en la experiencia de la especie, a lo largo de los siglos, como en la experiencia de los individuos, a lo largo de sus vidas.

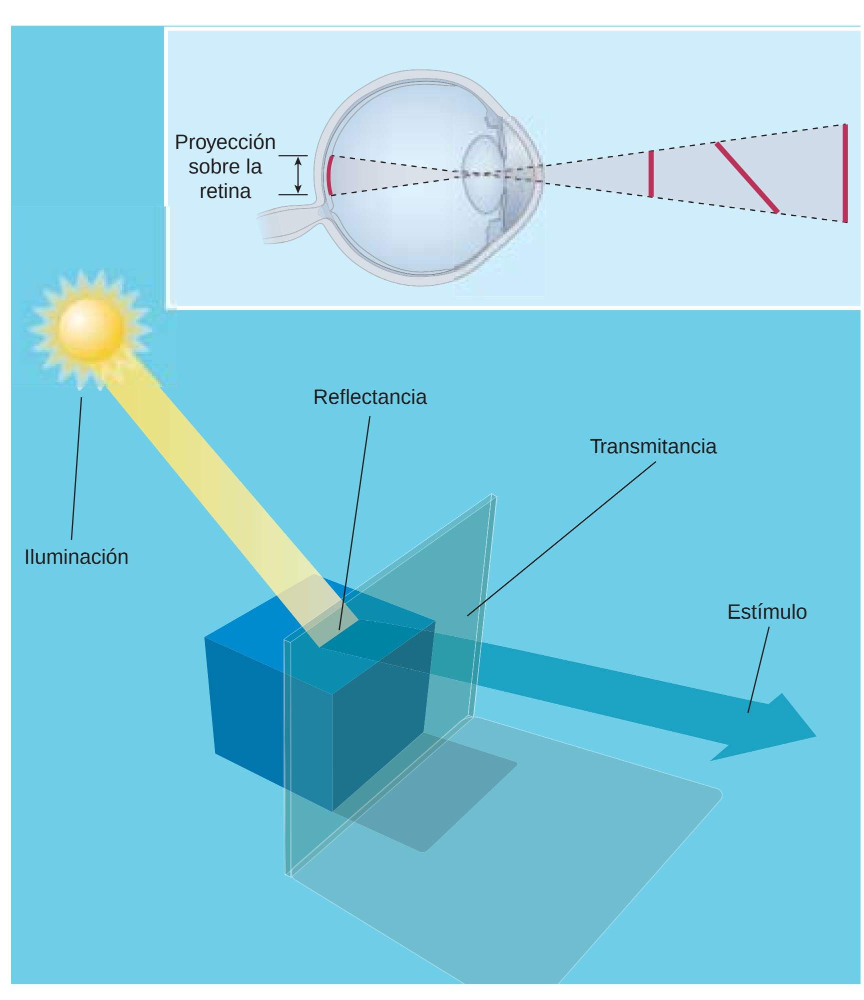
El fundamento de la brillantez

La intensidad física de un estímulo luminoso induce sensaciones de iluminación u oscuridad relativa, que constituyen, cabe defender, el aspecto más fundamental de la visión. Sería razonable presumir que la brillantez percibida debería guardar proporción con la intensidad de la luz, de modo que la llegada al ojo de una luz más intensa habría de estar siempre en correspondencia con una sensación de luz más intensa; pero no es así. La realidad es que dos superficies que reflejen hacia los ojos la misma cantidad de luz, físicamente medida, suelen parecer de diferente brillo si las superficies se observan en ambientes o fondos que estén a su vez devolviendo diferentes cantidades de luz. Tal fenómeno se denomina *contraste de brillos simultáneos*.

Los neurobiólogos, en el pasado, fundaban la explicación de este conocido efecto en las neuronas retinianas; éstas envían información desde el ojo hasta la porción visual del cerebro y reaccionan, por razones que tienen que ver con la optimización de la detección de bordes, más vigorosamente a una mancha gris en un ambiente oscuro que a la misma mancha en uno claro. Si la frecuencia de disparo de las neuronas retinianas determinase el brillo aparente de las regiones, sería de esperar que la mancha sobre fondo oscuro diera la impresión de brillar más que la misma mancha sobre un fondo más claro.

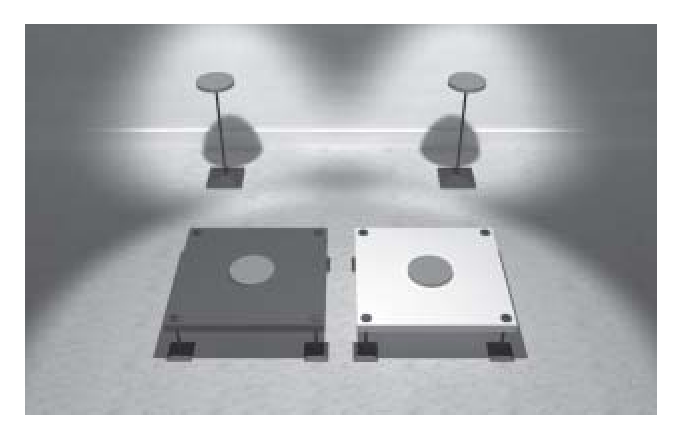
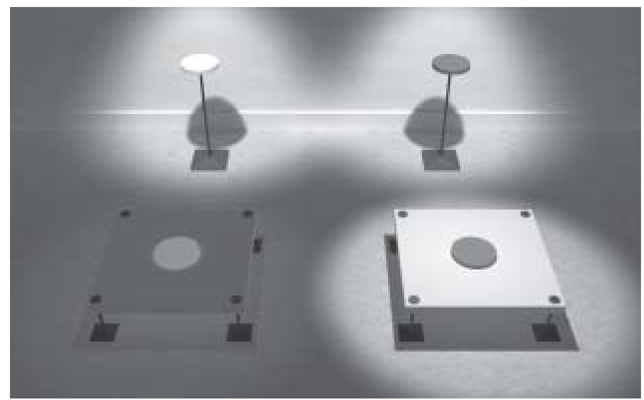
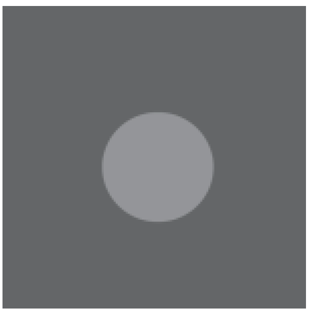
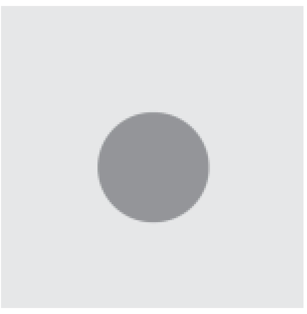
Esta interpretación tropieza, entre otras cosas, con que también se puede lograr que parezca que brillan con distinta intensidad regiones inmersas en vistas donde tienen exactamente el mismo entorno. De hecho, como Wilhelm von Bezold, un físico del siglo XIX, demostró, una diana rodeada por un terreno de luminancia predominantemente superior puede parecer —en circunstancias apropiadas— más brillante que esa misma diana rodeada por un terreno de menor luminancia media. Tal situación es justamente la opuesta de la forma normal del efecto de contraste de brillos simultáneos, y lo contrario de lo que pronostica la explicación del brillo a partir de la frecuencia de disparo neuronal retiniano.

¿Cómo pueden explicarse, pues, estos hechos desconcertantes de la relación entre la intensidad física de la luz y la sensación de brillo asociada? Recordemos que la igualdad de las intensidades de luz emanadas de las dos porciones de superficie de que se trata es ambigua de por sí. Es decir, que superficies de similar reflectancia bajo el mis-



2. LO QUE VEMOS ESTA DETERMINADO por diversas propiedades de la luz. La luz que llega a la retina depende de la iluminación del objeto, de cuántas y cuáles componentes de la iluminación se reflejan y de cómo se transmite la luz reflejada a través de los medios interpuestos, se trate del aire o del cristal (*parte de abajo, a la izquierda de la ilustración*). Además, una misma proyección sobre la retina puede estar generada por un objeto pequeño y cercano, por otro grande y lejano, o por un objeto a distancia intermedia que se halle inclinado (*arriba, a la derecha*). Estos hechos elementales vuelven ambiguos todos los estímulos visuales.

DALE PURVES, R. BEAU LOTTO, SURAJIT NUNDY Y MARK WILLIAMS

3. EL CONTRASTE DE BRILLOS SIMULTANEOS se define como la diferencia del brillo aparente de una misma superficie en ambientes distintos. En este caso, una misma diana gris —la figura circular— parece más brillante sobre fondo oscuro que en otro más claro (*izquierda*). Los dibujos de arriba permiten ver que este estímulo puede proceder de diversas situaciones físicas: regiones físicamente idénticas sobre superficies pintadas de distinta manera (*arriba, a la izquierda*) y regiones físicamente diferentes bajo diferentes iluminantes (*arriba, a la derecha*). Dado que el estímulo ordinario de los brillos simultáneos —las dianas grises (*izquierda*)— contiene información que es compatible tanto con dos superficies semejantes bajo iluminantes similares, como con dos superficies diferentes bajo iluminantes diferentes, el observador ve valores de brillo que toman en consideración ambas posibilidades.

DALE PURVES, R. BEAU LOTTO, SURAJIT NUNDY Y MARK WILLIAMS

mo iluminante y superficies de reflectancia disímil sometidas a distintas cantidades de iluminación pueden generar en el ojo estímulos idénticos.

Supongamos que esta incertidumbre queda enteramente resuelta merced a la experiencia adquirida con lo que las fuentes de tales estímulos resultaron ser, determinada a su vez por el éxito o fracaso de la conducta correspondiente. Entonces, en la medida en que un estímulo de esta suerte concuerde con la experiencia previa sobre superficies diana reflectantes expuestas al mismo iluminante, las dianas tenderán a aparecer de brillantez similar, porque, para que la conducta pueda aprovecharlas, las cosas que son iguales tienen que parecer iguales. Sin embargo, en la medida en que el estímulo sea compatible con que se trate de objetos con diferente reflectividad bajo distintas intensidades de iluminación, las dianas tenderán a parecer distintas en brillo, porque para ser útiles al observador las cosas que son diferentes tienen que parecer diferentes. Dado que la información contenida en los estímulos normales del contraste de brillos simultáneos concuerda tanto con dos superficies diferentes bajo distintos iluminantes, como con superficies parecidas bajo iluminaciones parecidas, lo que el observador ve reflejará ambas posibilidades. El estímulo es, en términos estadísticos, compatible en cierto grado con superficies que poseen reflectancias distintas; de ahí que zonas idénticas parezcan tener brillos diferentes en una muestra ordinaria del contraste de brillos simultáneos.

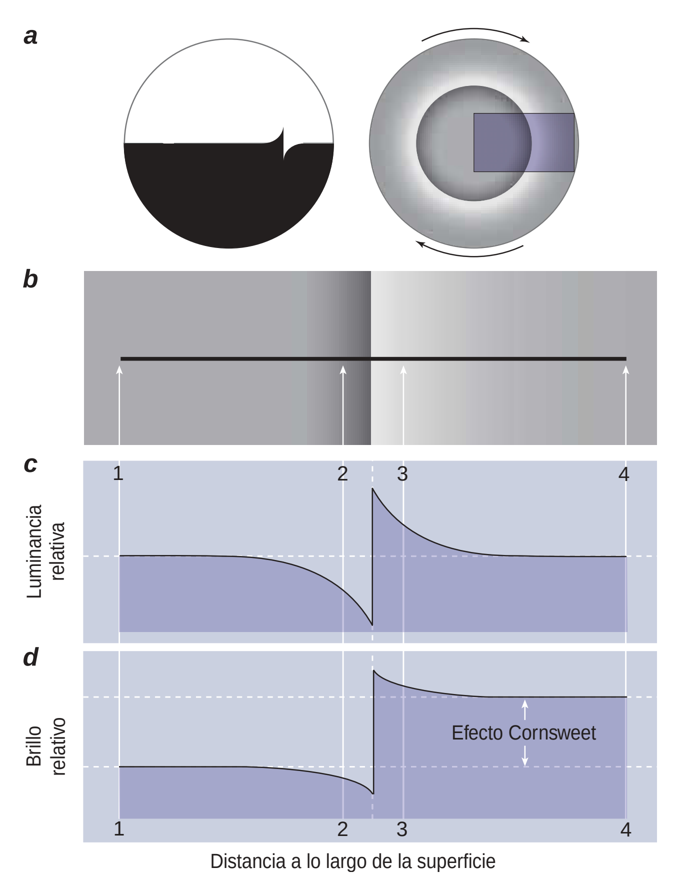
Puede ésta parecer una extraña manera de generar estímulos visuales. Sin embargo, ante la inevitable incertidumbre de la información contenida en la imagen retiniana, tal vez sea la forma mejor —si no la única— de resolver el dilema de Berkeley.

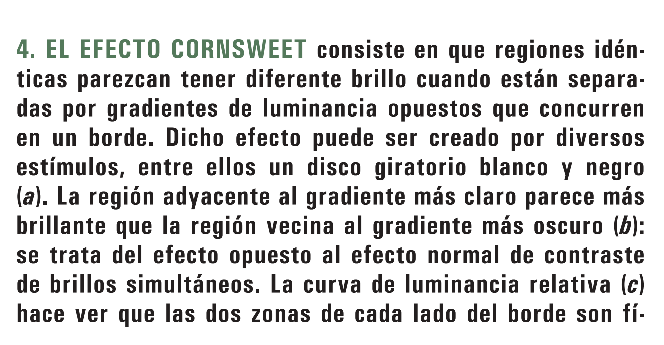
Estímulos complejos

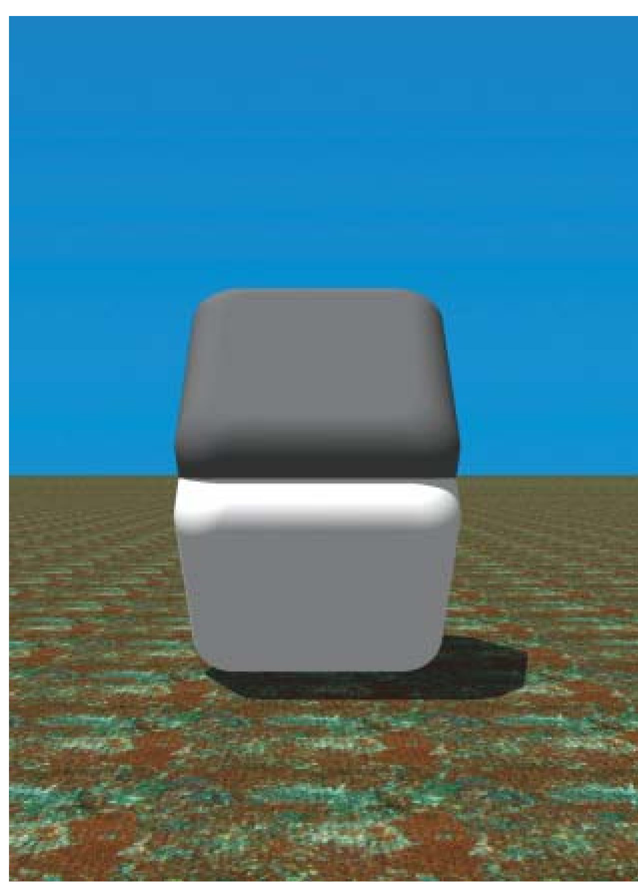
Si esta explicación general fuese correcta, debería inducir el mismo efecto perceptual cualquier estímulo en el que territorios diana con una misma luminancia hayan resultado ser, de ordinario, objetos reflectantes distintos expuestos a diferentes cantidades de luz. Un problema particularmente interesante lo constituye la percepción generada por un estímulo más complejo, el borde de Cornsweet, así llamado en honor de Tom Cornsweet, el psicólogo que describió este efecto a finales del decenio de 1960.

En el efecto Cornsweet, gradientes opuestos de luminancia que se encuentran en un borde hacen que regiones contiguas, físicamente idénticas, parezcan tener distinto brillo. Concretamente, la región contigua al gradiente más claro parece más brillante que la región contigua al gradiente más oscuro. Dado que este efecto perceptivo es el contrario del efecto normal de contraste de brillo simultáneo, el estímulo Cornsweet proporciona un ejemplo más de por qué no funcionan las explicaciones basadas en las relaciones de contraste local.

A pesar de su estructura complicada, el efecto borde Cornsweet puede también ser explicado en términos empíricos. El denominador común del estímulo Cornsweet y de los estímulos ordinarios con contraste de brillos simultáneos es que las percepciones pueden, en ambos casos, entenderse gracias a las po-







4. EL EFECTO CORNSWEET consiste en que regiones idénticas parezcan tener diferente brillo cuando están separadas por gradientes de luminancia opuestos que concurren en un borde. Dicho efecto puede ser creado por diversos estímulos, entre ellos un disco giratorio blanco y negro (*a*). La región adyacente al gradiente más claro parece más brillante que la región vecina al gradiente más oscuro (*b*): se trata del efecto opuesto al efecto normal de contraste de brillos simultáneos. La curva de luminancia relativa (*c*) hace ver que las dos zonas de cada lado del borde son físicamente idénticas, pero una representación gráfica de la percepción del brillo (*d*) indica que el lado derecho parece más brillante que el izquierdo: en ello consiste el efecto Cornsweet. Los bloques que ponen de manifiesto el efecto Cornsweet en una escena visual (*e*) intensifican la ilusión, porque la información presentada aumenta la probabilidad de que los dos bloques sean superficies reflectantes distintas bajo iluminantes diferentes. El bloque superior parece ahora mucho más oscuro que el inferior, a pesar de que ambos son idénticos.

sibles fuentes de los territorios diana físicamente idénticos. Así, las regiones equi-iluminantes que lindan con los gradientes que comprenden un borde de Cornsweet podrían haber sido generadas por superficies de pareja reflectividad bajo el mismo iluminante —unos gradientes pintados en la superficie de una hoja de papel sobre la cual la luz incide uniformemente— o bien por superficies de diferente reflectividad expuestas a distintas intensidades de iluminación —un hexaedro, digamos, de bordes redondeados situado de modo que una de las caras se encuentre a la luz y la otra, en la sombra—. Ambos supuestos, y una multitud más, son posibles en la realidad; según una teoría exclusivamente probabilística de la visión, la percepción suscitada por el estímulo tomará en consideración todas las posibles fuentes, en proporción con la frecuencia con que se dieron en el pasado. Dado que, a menudo, el estímulo habrá sido generado por superficies reflectantes diferentes con distintas iluminaciones, como en el supuesto del cubo, los territorios diana parecerán tener diferente brillo.

Si esta explicación estadística basada en la experiencia previa tuviera algún valor, entonces el efecto perceptual del borde de Cornsweet debería resultar acentuado, disminuido o abolido en cuanto se alterasen las probabilidades relativas de las posibles fuentes del estímulo, sin modificar el estímulo en sí. Como varios experimentos ponen de manifiesto, eso es lo que ocurre.

Visión de los colores

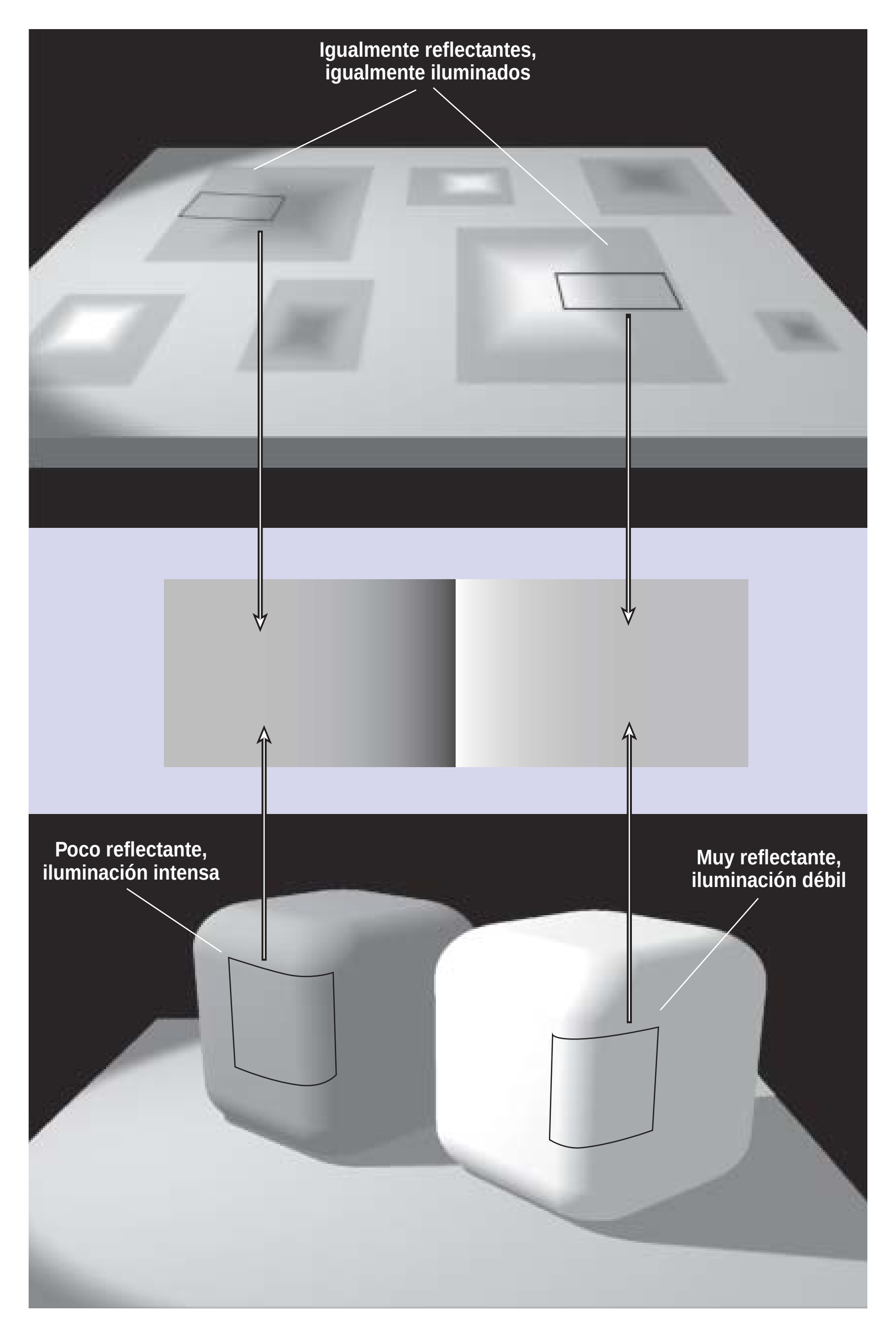
Estos aspectos, un tanto desconcertantes, de las sensaciones suscitadas por la intensidad de luz pueden entenderse como fruto de una estrategia enteramente probabilística de la visión. ¿No se originarían de igual manera las sensaciones cromáticas suscitadas por diferentes espectros de luz? Después de todo, la distribución de potencia

DALE PURVES, R. BEAU LOTTO, SURAJIT NUNDY Y MARK WILLIAMS

espectral en un estímulo luminoso, que da lugar a las sensaciones de color, es ambigua debido, precisamente, a las mismas razones por las que lo es la intensidad espectral total. La iluminación, la reflectancia y otros factores determinantes de las características de la luz que llega al ojo se entremezclan en la imagen retiniana, y no es posible disociarlas.

Para pensar sobre las sensaciones de color conforme a este planteamiento, tenemos un buen punto de partida en el contraste de colores simultáneos, un fenómeno similar a los efectos de contraste de brillo ya descritos. Dos dianas de igual composición espectral, ubicadas en ambientes coloreados de distinto modo, sirven de estímulo patrón para suscitar el contraste de color. Lo mismo que en el contraste de brillo, las dos dianas parecen diferentes, aunque ahora en lo que se refiere a sus respectivas cualidades de color, a saber, matiz, saturación y brillo de color. En el pasado, la mayoría de las explicaciones de este fenómeno se fundaban en algún tipo de promedio del color extendido a la totalidad del estímulo. Sin embargo, al igual que en el contraste de brillo, así no se explica que los estímulos de contraste de color pueden modificarse de forma que unos mismos promedios cromáticos en el ambiente susciten diferentes percepciones de color.

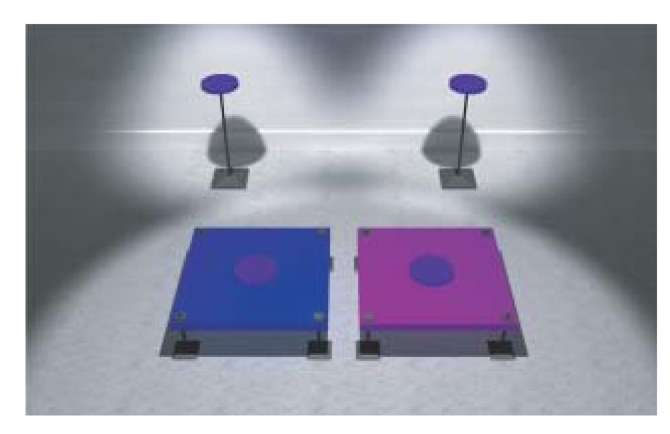
Cabe, no obstante, dar una explicación del contraste de color en términos empíricos. Las fuentes de la diana y del ambiente en los estímulos ordinarios con contraste de color son inciertas: un número infinito de combinaciones de reflectancias e iluminantes —amén de otros factores menos cruciales— puede engendrar unas mismas distribuciones de potencia espectral. Al igual que en el caso de los estímulos acromáticos, el sistema visual podría resolver este dilema por retroalimentación del éxito o fracaso de anteriores respuestas en la conducta a los estímulos espectrales. La percepción suscitada por un estímulo dado estaría así determinada por las frecuencias relativas de aparición en el mundo real de combinaciones de reflectantes e iluminantes que dieron origen, en ocasiones anteriores, a esa distribución de potencia espectral. Puede aplicarse el mismo argumento a un fenómeno asociado, la constancia de color; en ésta, el objeto continúa pareciendo conservar el color a pesar de hallarse bajo iluminantes diferentes.

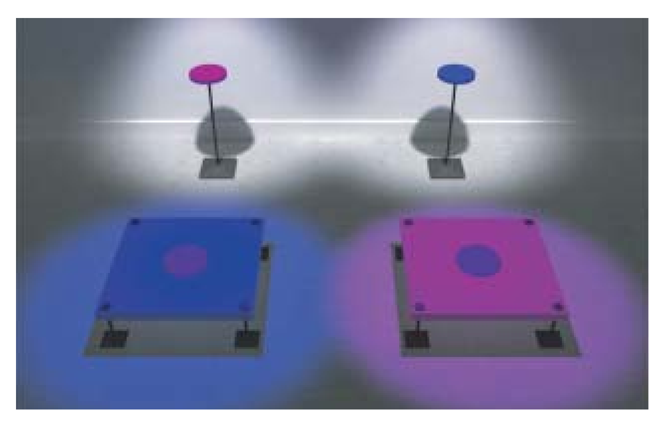


5. PUEDE CREARSE UN ESTIMULO CORNSWEET en diversas situaciones. Tanto la alineación de gradientes derivados de hojas de papel igualmente iluminadas (*arriba*) como los gradientes de cubos de diferente reflectancia con aristas redondeadas, colocados de modo que una de las caras se encuentre a la luz y la otra en la sombra (*abajo*), generan el mismo borde de Cornsweet. Los observadores aprecian de nuevo el efecto porque las dos posibles fuentes están incorporadas a la percepción del estímulo ambiguo.

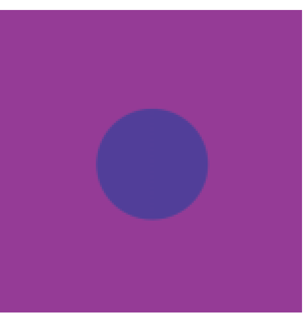
DALE PURVES, R. BEAU LOTTO, SURAJIT NUNDY Y MARK WILLIAMS

Si las percepciones de contraste y de constancia de color se generasen de la forma indicada, sería de esperar que una misma diana espectral, sobre dos fondos cromáticamente diferentes, engendrara sensaciones cromáticas diferentes. La razón es que, además de reque-









6. SE PRODUCE UN CONTRASTE DE COLORES SIMULTANEOS cuando unas mismas superficies, situadas sobre fondos coloreados de distinta forma, parecen ser de distinto color. En este caso, una misma diana cromática tiene apariencia rojiza sobre un fondo azul; más violácea, en cambio, sobre un fondo más rojo (*a la izquierda*). En la ilustración de arriba queda manifiesta la ambigüedad del estímulo, que podría surgir tanto de dianas físicamente idénticas —solas sobre peanas— bajo luces iguales (*arriba, a la izquierda*) pero situadas en ambientes coloreados de distinto modo, como de dianas físicamente diferentes iluminadas con luces de colores distintos (*arriba, a la derecha*). Lo mismo que antes, el contraste de colores simultáneos surge porque el sistema visual incorpora a la percepción estas distintas posibles fuentes de acuerdo con la frecuencia con que ocurrieron en el pasado.

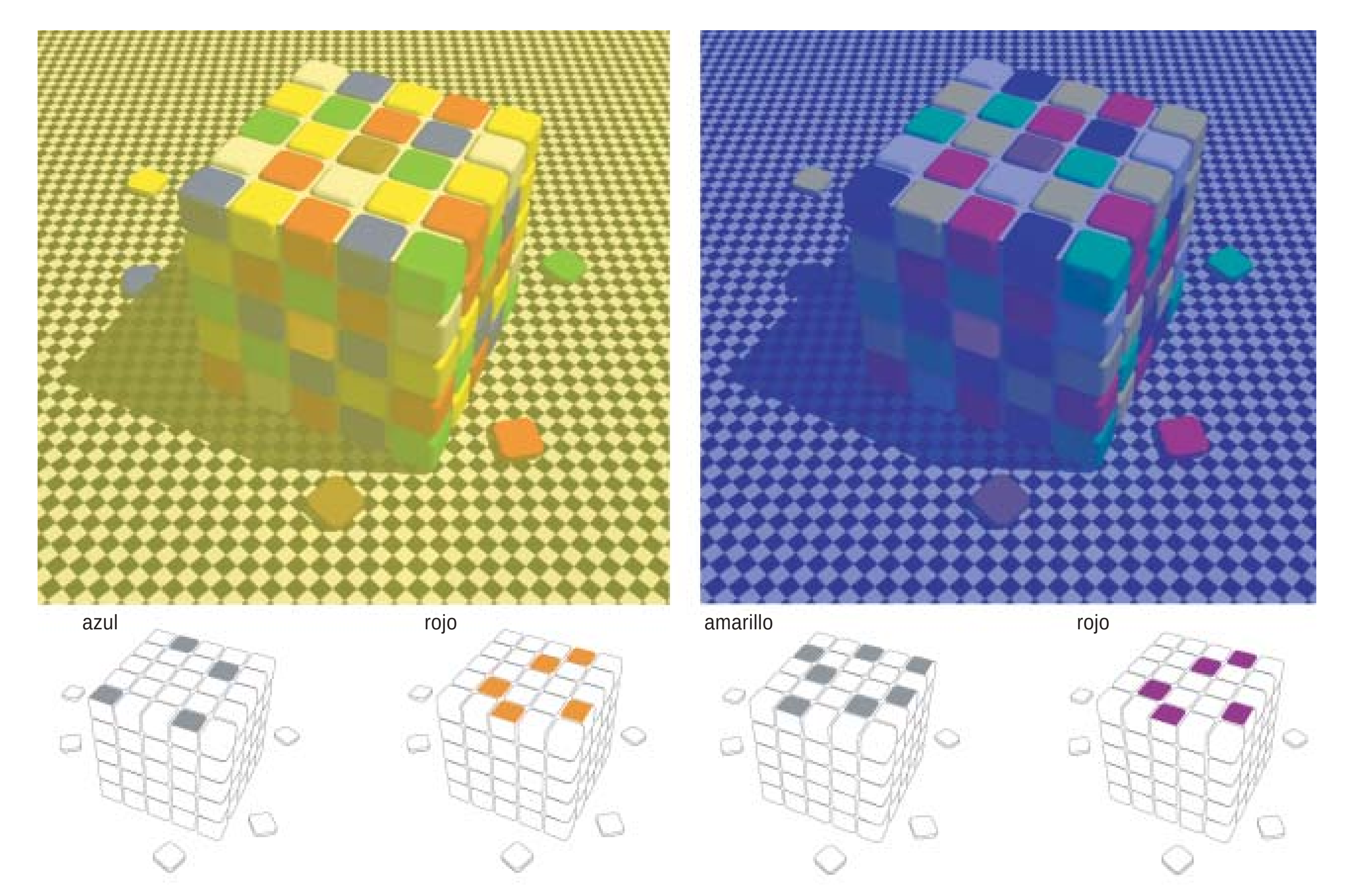
rir conductas apropiadas ante las mismas reflectancias con idéntico iluminante, tales estímulos habrían requerido en otras circunstancias conductas apropiadas a las dianas que surgiesen de diferentes reflectancias con diferentes iluminantes. Por consiguiente, un estímulo espectral debería inducir una sensación que incorporase todas las posibles fuentes subyacentes en proporción a sus pasadas apariciones en la experiencia humana.

Para evaluar los méritos de esta forma de entender las percepciones de color, ideamos un estímulo que recuerda un tanto a un cubo de Rubik. Si los efectos de las diferencias espectrales se atenían a ese principio probabilístico, podríamos generar efectos de contraste y de constancia de color que fueran mucho más llamativos que las ilustraciones habituales que los libros de texto les dedican. Por ejemplo, cuando se hacía que la información de una escena visual donde estaba presente el cubo concordase con una iluminación amarillenta o con una azulada, podía lograrse que teselas de la superficie del cubo que presentaban el mismo tono de gris en un contexto neutral pareciesen azuladas o amarillentas, respectivamente. Esta intervención proporciona un ejemplo de contraste de color que, gracias a la manipulación empírica de la información de la escena, resulta impresionante. Recíprocamente, se podía hacer, mediante una modificación de la probabilidad de sus posibles fuentes, que teselas que parecían tener diferente color en una situación neutra se percibiesen del mismo color: una exhibición, no menos impresionante, de constancia de color. Estas demostraciones no sólo muestran que el contraste y la constancia de color están determinados probabilísticamente, sino también que esos dos efectos, en apariencia opuestos, constituyen manifestaciones de la misma generación empírica de las percepciones visuales.

Percepción de la geometría de una escena visual

Los investigadores de la visión observaron, hace mucho ya, que la percepción de líneas no siempre concuerda con la geometría real de los objetos subyacentes. Por ejemplo, los ángulos formados por líneas que componen, o dan a entender, un ángulo agudo son vistos como si tuvieran algunos grados más de los que realmente tienen, mientras que los ángulos obtusos se perciben como si tuvieran algunos menos. Pese a las muchas cábalas acerca de esta anomalía formuladas ya desde finales del siglo XIX, no ha habido acuerdo sobre su origen. Nos preguntamos, pues, si estos y otros errores de percepción geométrica no se explicarían con las mismas nociones empíricas que el brillo o el color.

De modo muy similar a la luminancia o la potencia espectral, el estímulo causante del ángulo percibido es profundamente ambiguo. Un ángulo proyectado sobre una superficie —la retina, por ejemplo— puede ser resultado de objetos que tengan una variedad de amplitudes angulares y de longitudes de brazos, dispuestos en una infinidad de posibles orientaciones en el espacio de tres dimensiones. Al interactuar con los objetos que suscitan determinadas proyecciones angulares en



7. EL CONTRASTE Y LA CONSTANCIA DE COLOR surgen de la generación empírica de percepciones visuales. En este ejemplo generado por ordenador, los autores controlaron la información espectral de la escena visual. En las imágenes superiores los cubos se muestran como si estuvieran bajo luz amarillenta (*arriba, a la izquierda*) o azulada (*arriba, a la derecha*). En las imágenes de la parte baja se muestran, fuera de esos contextos, teselas concretas que revisten interés. Las facetas que parecen amarillas representadas como si estuvieran bajo luz azul y las facetas que parecen azules representadas como si estuvieran bajo luz amarilla son, en realidad, grises, como se indica en los cubos inferiores rotulados "azul" y "amarillo". Se trata de un llamativo ejemplo de contraste de color. Por otra parte, las facetas que parecen rojas representadas como si estuvieran bajo una luz azul o bajo una luz amarilla, corresponden en realidad, ambas, a facetas moradas y anaranjadas, respectivamente, como se indica en los cubos rotulados "rojo". El experimento demuestra la constancia de color. Estos notables efectos hacen ver que se puede lograr que unas mismas dianas parezcan de colores muy diferentes y que colores diferentes pueden parecer iguales si se manipula el contexto.

DALE PURVES, R. BEAU LOTTO, SURAJIT NUNDY Y MARK WILLIAMS

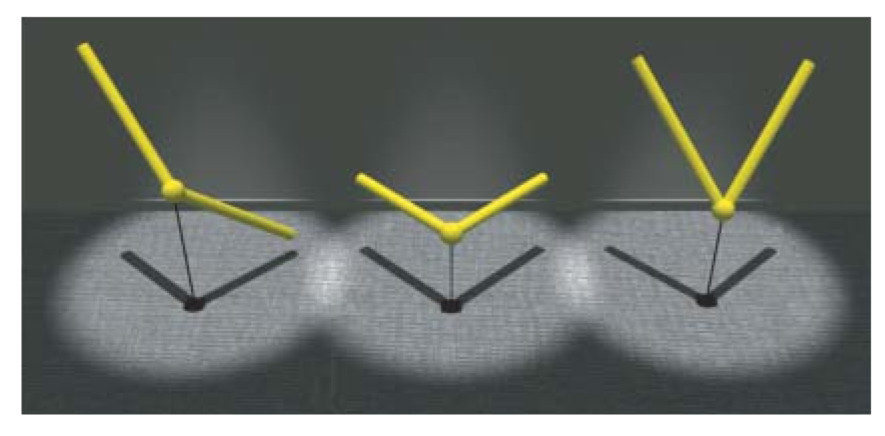
la retina, los observadores de todos los tiempos habrán experimentado grandes variaciones entre un ángulo dado en la proyección retiniana y los ángulos de sus fuentes en el mundo real. Se trata, además, de variaciones sistemáticas. En consecuencia, sería de esperar que las percepciones suscitadas por diferentes ángulos proyectados sobre la retina se encontraran en correspondencia con estas distribuciones de frecuencia.

Para poner a prueba esta interpretación, necesitábamos en primer lugar determinar la distribución de probabilidad de todas las posibles fuentes tridimensionales de un ángulo proyectado. Cuando se computaron todas estas distribuciones, para todos los ángulos posibles, aplicando los principios de la geometría proyectiva, hallamos que las proyecciones de ángulos agudos proceden habitualmente de fuentes con ángulos mayores que las proyecciones. Recíprocamente, las fuentes de proyecciones en ángulo obtuso están, típicamente, engendradas por fuentes que son algo menores que el ángulo proyectado. Las proyecciones en ángulo recto y las líneas rectas vienen generadas por fuentes que, en promedio, tienen la amplitud angular del propio objeto. Si las percepciones están determinadas empíricamente, el sistema visual debería generar percepciones de ángulos que incorporen y reflejen estos hechos estadísticos de la geometría proyectiva.

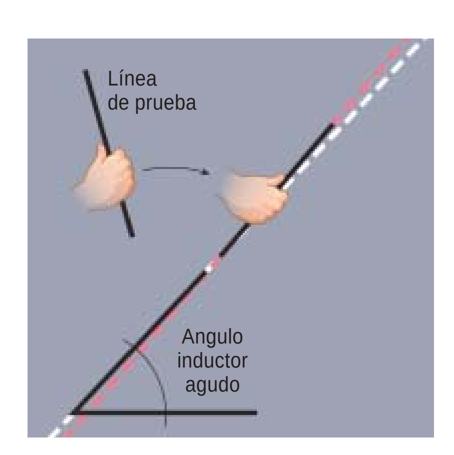
Evaluamos esta predicción solicitando a sujetos experimentales que informasen de sus percepciones de diferentes estímulos angulares en una serie de tests, en los cuales el ajuste de una línea de prueba indicaba la amplitud angular que realmente estaban viendo. Por ejemplo, si el sujeto percibía que el ángulo era mayor de lo que realmente era, la línea de prueba quedaba situada en una posición que revelaría tal discrepancia: no sería plenamente paralela al lado del ángulo. Los resultados deducidos de

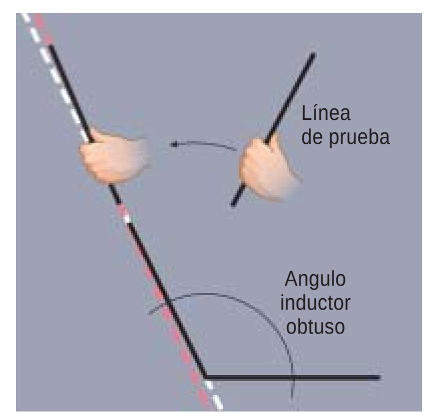
estos ensayos encajaban francamente bien con la distribución de probabilidad de las posibles fuentes de los correspondientes estímulos, lo que indicaba que la organización espacial que ven los observadores no es ni la proyección retiniana ni su fuente real, sino su significado empírico, vale decir, en el pasado.

Tomadas en su conjunto, estas pruebas extraídas de la percepción del brillo, del color y de la disposición geométrica respaldan que el problema descubierto por Berkeley tiene su solución en que las percepciones visuales se generen a partir de la distribución de probabilidad de las posibles fuentes del estímulo visual, cualquiera que éste sea. Como resultado, los observadores ven más lo que una escena visual significó de ordinario en el pasado, que lo que realmente es en el presente. Vemos lo que vemos, pues, porque la estadística de las experiencias previas es el fundamento en que el sistema visual se asienta para enfrentarse a la ambigüedad inherente en los estímulos visuales.



8. LA PERCEPCION DE LOS ANGULOS no se corresponde normalmente con los ángulos de los objetos subyacentes. La proyección de un ángulo sobre una superficie, la de la retina por ejemplo, puede tener origen en una multitud de ángulos y de longitudes de sus brazos, dispuestos en una infinidad de orientaciones en el espacio tridimensional. Los tres objetos angulares aquí mostrados tienen aperturas de 120 grados (*izquierda*), 90 grados (*centro*), y 60 grados (*derecha*), y brazos de diversas longitudes, pero es posible situarlos de modo que tengan proyecciones idénticas, como se aprecia por sus sombras.





9. ERRORES SISTEMATICOS EN LA ESTIMACION DE ANGULOS. La distribución (estadística) de fuentes, para todos los ángulos posibles, revela que las proyecciones de los ángulos agudos suelen provenir de fuentes cuyos ángulos son mayores que sus proyecciones, mientras que las proyecciones de los ángulos obtusos están, en promedio, generadas por fuentes de amplitudes algo menores que el ángulo proyectado. El sistema visual debería incorporar estos hechos estadísticos. Para comprobarlo, los autores pidieron a voluntarios que superpusieran una línea de prueba sobre uno de los lados de un "ángulo inductor". Cuando el ángulo inductor era agudo (*izquierda*), los sujetos orientaron la línea de prueba como si el ángulo inductor fuera mayor de lo que realmente era. Con un ángulo obtuso (*derecha*), los sujetos la orientaban como si el ángulo inductor fuese menor que el real. En conjunto, los resultados reflejaban la distribución de probabilidad de las posibles fuentes de estímulo. Lo mismo que en la percepción de brillo y de color, quedó claro que los ángulos que vemos están basados en el significado empírico de los estímulos, no en sus dimensiones físicas.

Bibliografía complementaria

THE INFLUENCE OF DEPICTED ILLUMINATION OF PERCEIVED BRIGHTNESS. S. M. Williams, A. N. McCoy y D. Purves, en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 95, págs. 13.301-13.306; 1998.

AN EMPIRICAL EXPLANATION OF BRIGHTNESS. S. M. Williams, A. N. McCoy y D. Purves, en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 95, págs. 13.301-13.306. 1998.

THE EFFECTS OF COLOR ON BRIGHTNESS. R. B. Lotto y D. Purves, en *Nature Neuroscience*, vol. 2, págs. 1010-1014; 1999.

AN EMPIRICAL EXPLANATION OF THE CORNSWEET EFFECT. D. Purves, A. Shimpi y R. B. Lotto, en *Journal of Neuroscience*, vol. 10, págs. 8542-8551; 1999.

AN EMPIRICAL EXPLANATION OF COLOR CONTRAST. R. B. Lotto y D. Purves, en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 97, págs. 12.834-12.839; 2000.

WHY ARE ANGLES MISPERCEIVED? S. Nundy, R. B. Lotto, D. Coppola, A. Shimpi y D. Purves, en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 97, n.º 10, págs. 5592-5597; 2000.

WHY WE SEE THINGS THE WAY WE DO: EVIDENCE FOR A WHOLLY EMPIRICAL STRATEGY OF VISION. D. Purves, R. B. Lotto, S. M. Williams, S. Nundy y Z. Yang, en *Philosophical Transaction of the Royal Society of London B*, vol. 356, págs. 285-297; 2001.

A RATIONALE FOR THE STRUCTURE OF COLOR SPACE. R. B. Lotto y D. Purves, en *Trends in Neuroscience*, vol. 25, págs. 84-88; 2002.

DALE PURVES, R. BEAU LOTTO, SURAJIT NUNDY Y MARK WILLIAMS



Cartas encadenadas

e historiales de evolución

Un estudio de las cartas encadenadas hace ver el modo de inferir el árbol genealógico de todo cuanto evolucione en el tiempo, ya sean genomas, lenguas o ejercicios copiados

Charles H. Bennett, Ming Li y Bin Ma

Tenemos en nuestras manos 33 versiones de una carta encadenada, recopiladas entre 1980 y 1995, cuando eran de uso general las fotocopiadoras, pero todavía no el correo electrónico. Fueron pasando de unos a otros destinatarios, mutando y evolucionando. Su longitud es, como la de un gen, de unos 2000 caracteres. Al igual que un potente virus, nos amenazan de muerte y nos incitan a que la hagamos llegar a nuestros "amigos y conocidos". Es probable que millones de personas hayan recibido alguna variante de esta carta. Al igual que los caracteres heredables, promete beneficios para uno mismo y para aquellos a quienes se la enviemos. A semejanza de los genomas, las cartas encadenadas experimentan una selección natural, y en ocasiones se transfieren porciones de unas u otras entre "especies" coexistentes. Mas, a diferencia del ADN, son fáciles de leer. Esa legibilidad las hace especialmente adecuadas para la enseñanza de la filogenia (historia evolutiva), sin necesidad de una previa iniciación en los arcanos de la biología molecular.

Las cartas constituyen un curioso fenómeno social, pero nuestro interés por ellas se debe también a que proporcionan un banco de pruebas para los algoritmos con los que la biología molecular infiere árboles filogenéticos a partir de los genomas de organismos existentes. A nuestro parecer, si tales algoritmos son de fiar, deberán producir buenos resultados cuando se los aplique a las cartas encadenadas. Valiéndonos de un nuevo algoritmo, de generalidad suficiente para ser de amplia aplicación a tales problemas, hemos reconstruido el árbol evolutivo de nuestras 33 cartas (*véase el recuadro* "La evolución de las cartas"). No les va tan bien con las cartas a los métodos ordinarios. Nuestro algoritmo, concebido para los genomas, se ha aplicado a los idiomas y utilizado para detectar plagios en los trabajos de los estudiantes: todo aquello que consista en una ristra de símbolos es agua para su molino.

Un virus mental

Las 33 cartas encadenadas constituyen una colección fascinante. Las hemos rotulado al azar de L1 a L33, sin atender a ningún criterio. Presentan considerables diferencias. Hay 15 títulos y 23 nombres de cierto "oficinista" y 25 del autor original distintos. Abundan las erratas, los intercambios de las posiciones de las oraciones, las frases o párrafos añadidos o ausentes. (Podemos ver una carta típica en el recuadro "Tema y variaciones", así como algunas de las muchas variantes.) Casi todas son fotocopias borrosas de textos mecanografiados; nos llevó a sospechar que las mutaciones surgieron por un proceso intermitente, en el cual una carta se fotocopiaba durante varias generaciones hasta que resultaba tan poco legible, que uno de los receptores decidía mecanografiarla de nuevo, introduciendo al hacerlo nuevos errores y variaciones.

A excepción de tres, las cartas que recibimos eran distintas. En los casos de L4, L6 y L22, nos llegó una segunda copia a los pocos meses de la primera. Además de las 33 escritas en inglés que recibimos, llegaron también (aunque no las incluimos en el estudio) cuatro en francés, una en holandés y una en alemán; todas ellas mostraban un claro parentesco con las redactadas en inglés.

Para analizar las cartas las hemos convertido en ficheros de texto en un ordenador, enteramente en minúsculas, eliminando al copiarlas datos superfluos, como las fechas, las notas marginales o la división del texto en líneas y párrafos. Cada carta quedó convertida, pues, en una ristra continua de caracteres.

Antes de aplicarles nuestro nuevo algoritmo, probamos a analizar las cartas con el método de alineación múltiple, de uso muy difundido en el examen de genes para la inferencia filogenética. Intenta alinear tantas secuencias concordantes de cada carta como sea posible. La cantidad de concordancia entre cualquier par de cartas define la semejanza de ambas; a partir de esos datos, otro algoritmo construye un árbol de evolución. Desdichadamente, la alineación múltiple sólo halla concordancias con los elementos que encuentra en un mismo orden, por lo que se confunde en las cartas L12 y L26, donde unas mismas oraciones aparecen en posiciones distintas. Por idéntica razón, se sabe que esta técnica funciona mejor con genes individuales que con genomas completos, en los que tales translocaciones son más frecuentes.

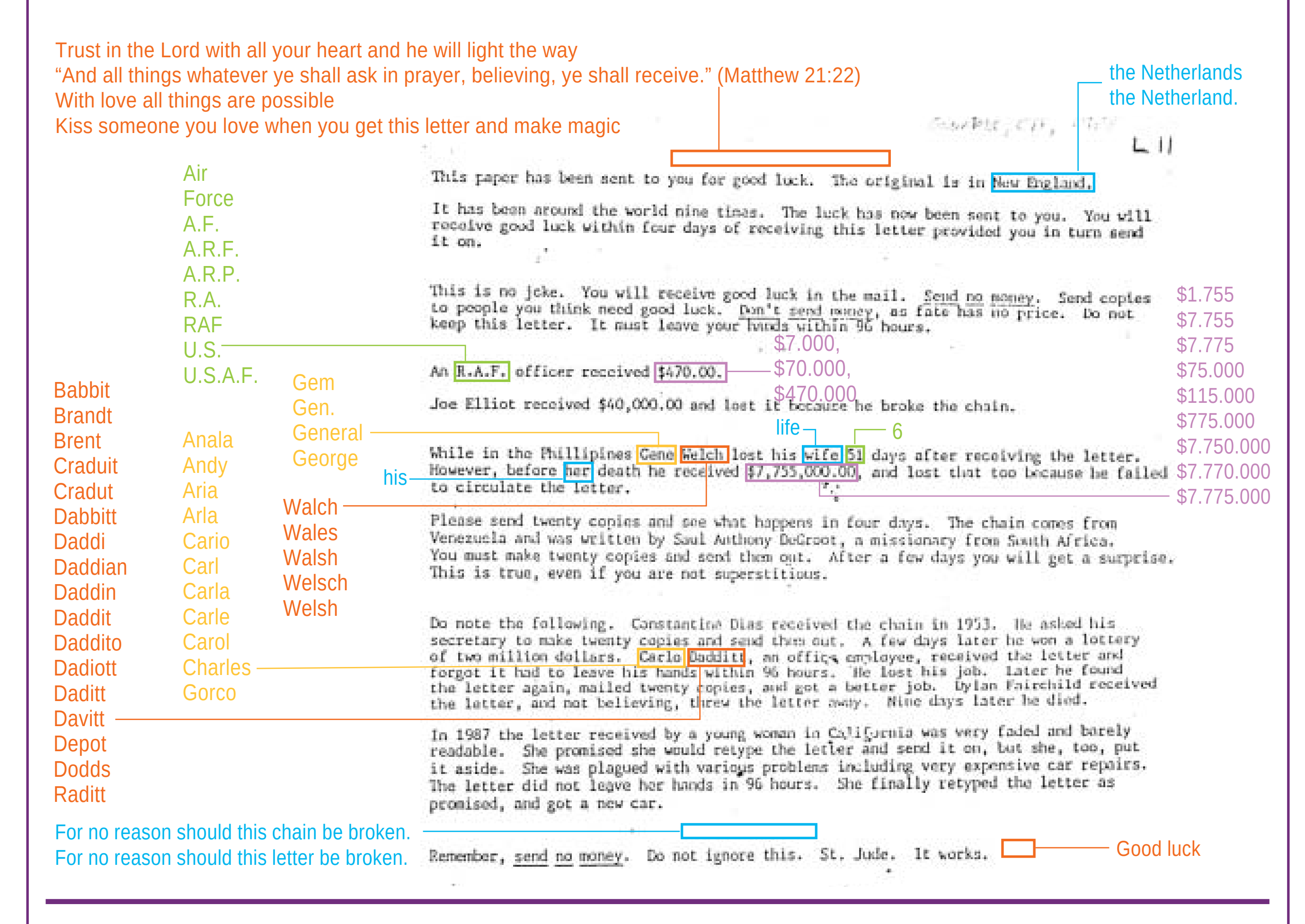
Probamos a dejar de lado las L12 y L26 y a aplicar la alineación múltiple con las 31 cartas restantes. Pero incluso con este conjunto truncado, el árbol resultante parecía ser incorrecto, pues clasificaba como estrechamente emparentadas a L6, L7 y L13. El error se producía porque estas tres cartas son bastante cortas, así que el número de discrepancias no resultaba muy grande. Este problema puede presentarse también en genética: el mero recuento de diferencias puede sobrevalorar la semejanza de genomas cortos e infravalorar la de los largos. Una medida idónea debería atribuir mayor peso a una diferencia pequeña entre genomas pequeños que a una diferencia pequeña entre genomas grandes.

Nos dedicamos a crear nuestra propia medida de semejanza, una medida apta para genomas, cartas encadenadas o cualquier otro tipo de datos susceptible de almacenarse en un fichero informático. Deseábamos que nuestra nueva medida de semejanza fuera insensible a mezcolanzas de poca monta, como las translocaciones, que sólo entrañan una pequeña pérdida de semejanza de la información comunicada. Para obviar las diferencias de longitud, nuestra medida debía asignar una puntuación de 0 a dos archivos completamente disímiles y una puntuación de 1 a dos archivos idénticos, con independencia de sus tamaños.

SARA CHEN

TEMA Y VARIACIONES

UNA CARTA ENCADENADA DE MUESTRA, la que rotulamos L11, pone de manifiesto algunas de las formas en que fueron variando las cartas al ser repetidamente mecanografiadas (según cabe presumir, cuando las fotocopias se volvían ilegibles). Las máximas variaciones se produjeron en los nombres poco corrientes y en las cantidades de dinero, errores que pasan fácilmente inadvertidos porque no alteran el significado.



L 11

This paper has been sent to you for good luck. The original is in New England.

It has been around the world nine times. The luck has now been sent to you. You will receive good luck within four days of receiving this letter provided you in turn send it on.

This is no joke. You will receive good luck in the mail. Send no money. Send copies to people you think need good luck. Don't send money, as fate has no price. Do not keep this letter. It must leave your hands within 96 hours.

An R.A.F. officer received $470.00.

Joe Elliot received $40,000.00 and lost it because he broke the chain.

While in the Phillipines Gene Welch lost his wife 51 days after receiving the letter. However, before her death he received $7,755,000.00, and lost that too because he failed to circulate the letter.

Please send twenty copies and see what happens in four days. The chain comes from Venezuela and was written by Saul Anthony DeGroot, a missionary from South Africa. You must make twenty copies and send them out. After a few days you will get a surprise. This is true, even if you are not superstitious.

Do note the following. Constantine Dias received the chain in 1953. He asked his secretary to make twenty copies and send them out. A few days later he won a lottery of two million dollars. Carlo Daddit, an office employee, received the letter and forgot it had to leave his hands within 96 hours. He lost his job. Later he found the letter again, mailed twenty copies, and got a better job. Dylan Fairchild received the letter, and not believing, threw the letter away. Nine days later he died.

In 1987 the letter received by a young woman in California was very faded and barely readable. She promised she would retype the letter and send it on, but she, too, put it aside. She was plagued with various problems including very expensive car repairs. The letter did not leave her hands in 96 hours. She finally retyped the letter as promised, and got a new car.

Remember, send no money. Do not ignore this. St. Jude. It works.

Confía en el Señor con todo tu corazón y El iluminará el camino
“Y todo cuanto pidáis con fe en la oración lo obtendréis” [Mateo 21: 22]
Con amor, todo es posible
Besa a quienes ames cuando recibas esta carta, y obrarás magia

En este papel le ha sido enviada la suerte. El original está en Nueva Inglaterra Países Bajos. Ha dado nueve veces la vuelta al mundo. Ahora le ha sido enviada la suerte. Recibirá usted la suerte en el plazo de cuatro días tras la recepción de esta carta, siempre que usted, a su vez, la envíe a otros. No es una broma. Recibirá la buena suerte por correo. No envíe dinero. Envíe copias a las personas a las que usted crea que les hace falta suerte. No envíe ningún dinero, pues el destino no tiene precio. No guarde esta carta. Ha de salir de sus manos antes de 96 horas.
Un oficial de la R.A.F. recibió 470,00 dólares.
Joe Elliot recibió 40.000,00 dólares y los perdió porque interrumpió la cadena.
Estando en las Filipinas, Gene Welch perdió a su esposa *wife* → *life*, vida 51 días después de recibir la carta. Sin embargo, antes de su muerte, había recibido 7.755.000,00 de dólares y los perdió también porque no hizo circular la carta. Por favor, envíe 20 copias y vea lo que ocurre en el plazo de cuatro días. La cadena partió de Venezuela y fue escrita por Saul Anthony DeGroot, un misionero venido de Sudáfrica.
Tiene usted que hacer 20 copias y enviarlas. Al cabo de pocos días recibirá usted una sorpresa. Es la verdad, aunque no sea usted supersticioso.
Preste atención a lo que sigue. Constantine Dias recibió la cadena en 1953. Le pidió a su secretaria que hiciese 20 copias y las enviase. Pocos días después ganaba a la lotería dos millones de dólares. Carlo Dadditt, un oficinista, recibió la carta y se olvidó de que tenía que salir de sus manos antes de 96 horas. Perdió su empleo. Más tarde volvió a encontrar la carta, envió 20 copias y logró un empleo mejor. Dylan Fairchild recibió la carta, no le prestó atención y la tiró. Murió a los nueve días. En 1987 la carta que recibió una mujer de California estaba muy borrosa y apenas si era legible. Aunque prometió mecanografiarla de nuevo y enviarla, también ella la dejó a un lado. Sufrió multitud de problemas y hubo de hacer varias reparaciones muy costosas a su coche. La carta no salió de sus manos en 96 horas. Finalmente, la mecanografió como había prometido y recibió un coche nuevo.

Esta cadena no se ha de romper por ningún motivo.
Esta carta no se ha de romper por ningún motivo.
Recuerde, no envíe dinero. Haga caso. San Judas. Esto funciona. Buena suerte

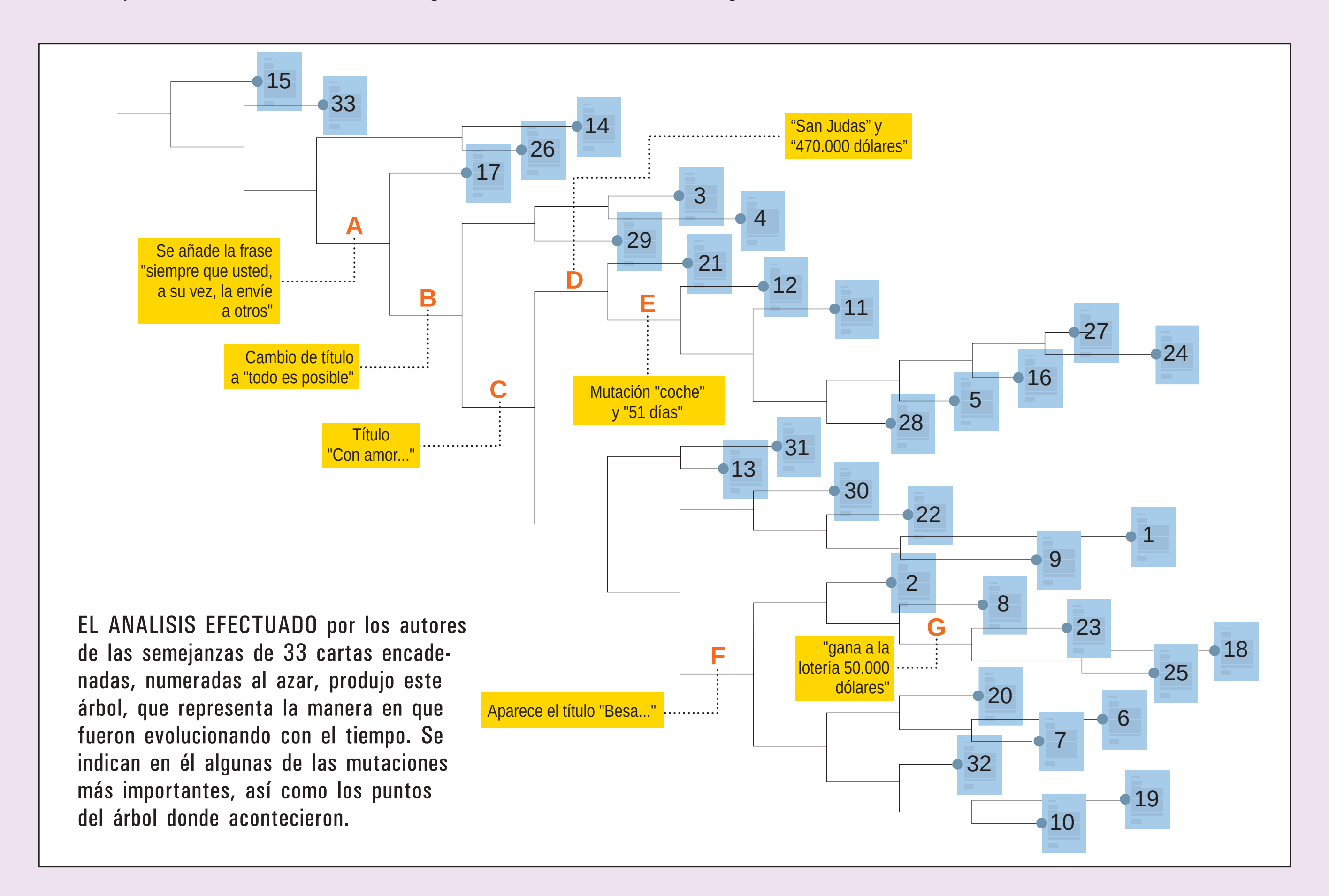
La evolución de las cartas

El árbol evolutivo de las cartas encadenadas, deducido por la medida automatizada de “parentesco” que han ideado los autores, permite observar cierto número de rasgos interesantes. (En el texto principal se han señalado algunos otros.) En el punto A se adoptó la frase “siempre que usted, a su vez, la envíe a otros”. En el punto B apareció un título nuevo: “Y todo cuanto pidáis con fe en la oración lo obtendréis.” En el punto C el título mutó nuevamente a “Con amor, todo es posible”. También en el punto C, “los Países Bajos” se convirtieron en “Nueva Inglaterra” y “General Welch” se trocó en “Gene Welch”. La instrucción “No se ha de romper por ningún motivo” se perdió.

En el punto F, el título se convirtió en “Besa a quienes ames cuando recibas esta carta, y obrarás magia”. Ya terminado nuestro análisis encontramos un estudio muy interesante y completo de más de 460 cartas encadenadas de muchos tipos distintos, efectuado por el matemático Daniel W. VanArsdale. Su estudio suscitaba una preguntaba: ¿Qué título llegó primero, el de “Besa a quienes...” o el de “Con amor...”? Todavía no hemos aplicado nuestro algoritmo a las muchas cartas encadenadas de su colección, pero a juzgar por nuestra filogenia, el título “Con amor...” fue anterior. Esta conclusión está respaldada también por la suma de dinero que Gene Welch recibe: en todas las cartas “Besa a quienes...” (excepto en la mutación producida en G) recibe 7755 dólares, mientras que en el grupo de las tituladas “Con amor...” obtiene 7.755.000. En el grupo anterior a C la cifra era 775.000 dólares. Está claro que la secuencia de mutaciones 755.000 → 7.755.000 → 7755 es menos violenta que 755.000 → 7755 → 7.755.000.

En el punto D, los 70.000 dólares engrosaron hasta 470.000 y se adoptó el “San Judas”. Ni la suma de 470.000 ni San Judas aparecen fuera de este grupo. En el punto E aparecieron concurrentemente otras dos interesantes alteraciones: se añadió el cuentecito sobre el coche de la californiana y el tiempo que media desde que Gene Welch recibe la carta hasta que pierde a su esposa aumenta de 6 a 51 días. Así se repite en todas las cartas del grupo que tienen su raíz en E, excepto la L28, que exige una explicación especial. La mutación “coche y 51” aparece sólo en las cartas del grupo E.

L28 da una prueba de la existencia de transferencias horizontales —de un “organismo” a otro por una vía distinta a la mera herencia—. En el grupo con raíz en D, cada una de las cartas afirma que un oficial de la R.A.F. recibe 470.000 o 470 dólares, a excepción de L28, en la que son 70.000. En L28 aparece también “Gen. Welch”, quien solamente figura en cartas anteriores al punto C. Todas las cartas del grupo D, a excepción de L21, incluyen el cuentecito del coche, y todas, excepto L21 y L28, la mutación “51 días”. Es increíble que L28 adquiriese a la vez los 70.000 dólares y Gen. Welch por mutaciones, de manera independiente con respecto a los otros puntos del árbol donde se producen esas mutaciones. Podríamos tratar de situar la mutación “coche y 51” antes de la mutación “470.000 dólares y San Judas”, pero en tal caso L21 habría de tener una génesis muy poco verosímil: o bien hubo de perder por completo la historia del coche y mutar “51 días” para que volviera a ser precisamente “6 días,” o bien hubo de adquirir “470.000 dólares” y “San Judas” de forma independiente. Al parecer, alguien tuvo en su posesión dos cartas al tiempo de componer L28 (o L21) e introdujo un gen foráneo de alguna carta anterior a C.



EL ANALISIS EFECTUADO por los autores de las semejanzas de 33 cartas encadenadas, numeradas al azar, produjo este árbol, que representa la manera en que fueron evolucionando con el tiempo. Se indican en él algunas de las mutaciones más importantes, así como los puntos del árbol donde acontecieron.

SARA CHEN

La medida natural del contenido de información de un fichero de datos no es su tamaño bruto en bits, sino el tamaño mínimo en que pueda condensarlo un programa de compresión, como Zip o StuffIt. Tales programas han sido concebidos para ahorrar espacio en los discos de los ordenadores; determinan y comprimen los tipos de redundancia más frecuentes (frases repetidas, por ejemplo); generan un fichero más pequeño, a partir del cual se reconstruye perfectamente el original.

Al comprimir conjuntamente dos ficheros, de modo que ambos puedan regenerarse desde el fichero comprimido, se produce un fenómeno interesante. Si no comparten información alguna, el fichero resultante de su compresión conjunta tendrá igual tamaño que la suma de los dos ficheros comprimidos por separado. En cambio, si contienen alguna información común, un buen programa de compresión la detectará y el fichero comprimido será menor. Así, la comparación del tamaño del fichero resultante de la compresión conjunta y de la suma de los tamaños de los ficheros comprimidos por separado proporciona una medida de la semejanza de los ficheros.

Esa medida no resulta todavía adecuada para nuestros fines, porque dos ficheros grandes tenderán a mostrar mayor semejanza que dos pequeños. Para corregir el problema, definimos nuestra medida de "parentesco" como la *proporción* de información compartida; es decir, el porcentaje en el que la suma de los ficheros comprimidos por separado supera el tamaño del archivo obtenido por compresión conjunta. De este modo, la gama de parentesco varía desde 0, para los ficheros sin ninguna relación, hasta 1 (o el 100 por ciento) para ficheros idénticos, cualquiera que sea el tamaño de los archivos.

¿De qué programa de compresión deberemos servirnos? Nuestra medida de parentesco dependerá de ello. Lo ideal sería disponer de un programa que comprimiera cada fichero hasta reducirlo al mínimo tamaño posible. El estudio de las medidas de información definidas en función de tal compresibilidad absoluta constituye una elegante rama de la teoría de la información, la teoría algorítmica de la información, o complejidad de Kolmogoroff (en recuerdo del matemático ruso Andrei N. Kolmogoroff, uno de sus fundadores). Por desdicha, se ha demostrado que a un tal programa ideal de compresión le llevaría un tiempo infinito ejecutar su tarea. Hemos optado por utilizar un algoritmo de compresión concreto, GenCompress, creado por Xin Chen, de la Universidad de California en Santa Bárbara. GenCompress fue concebido para los genomas, donde funciona bien. Como podremos ver, también opera correctamente con las cartas encadenadas.

Dado un conjunto de cartas encadenadas, el proceso de cálculo del parentesco de cada par mediante el programa GenCompress es sencillo y enteramente automático. El paso siguiente, que consiste en convertir los datos de parentesco en un árbol de evolución, es también automático en gran medida (existen a tal fin muchos paquetes informáticos). El resultado puede desembocar, ora en un sencillo diagrama arborescente de ramas de longitud arbitraria, semejante al que se muestra en el recuadro "La evolución de las cartas", que sólo ofrece una pauta cualitativa de descendencia, ora en un diagrama más detallado, en el que la longitud de las ramas expresa cuantitativamente el grado de parentesco.

En cualquier caso, el usuario ha de decidir —se trata de su principal contribución— dónde se sitúa la raíz del árbol, raíz que representa el hipotético antepasado común de todas las cartas (o especies). En las filogenias biológicas, denota una especie extinta hace millones de años; no puede ser demasiado estrecha su relación con las ramas de los organismos vivos en el presente. En nuestro estudio, las cartas encadenadas se recogieron a lo largo de un período de 15 años; algunas de ellas estaban fechadas cerca del principio de ese tiempo, por lo que hemos optado por situar la raíz cerca de una de ellas (L15). Por desgracia, la mayoría de esas cartas se guardó sin registrar ni el matasellos ni la fecha de recepción: el proyecto nació como afición; sólo se transformó en una investigación científica más tarde.

La filogenia de San Judas Tadeo

El árbol evolutivo que se ha inferido a partir de las cartas encadenadas parece constituir una filogenia casi "perfecta": los documentos que comparten una misma característica se hallan siempre agrupados. Una vez construido el árbol pudimos servirnos del mismo para formular numerosas hipótesis relativas a la forma en que evolucionaron las cartas.

Juzgamos, en primer lugar, que las cartas anteriores al punto C de nuestra filogenia son las más antiguas (*véase el recuadro* "La evolución de las cartas"). El indicio principal consiste en que el nombre "Carlo Dadditt" y el título de la carta exhiben en este grupo de cartas el mayor número de mutaciones. Esperamos que ese tipo de errores abunde en las cartas más antiguas porque no resultaba por entonces tan fácil recurrir a las fotocopiadoras; se las solía mecanografiar de nuevo. Además, entre las 14 cartas fechadas, las dos que aparecen en el grupo anterior a C (L4 y L15) son las más antiguas. Estas cartas más antiguas están todas tituladas con plegarias, pro-

Los autores

CHARLES H. BENNETT, MING LI y BIN MA colaboran en el estudio de las cartas encadenadas desde una excursión por los montes de Hong Kong durante la cual Bennett le habló a Li de su colección. Bennett trabaja en la división de investigación de la compañía en Yorktown Heights, en el estado de Nueva York. Su campo de investigación se centra en la física del procesamiento de información; es uno de los descubridores del teletransporte cuántico. Li, profesor de informática en la Universidad de Waterloo en Ontario, estudia la bioinformática y la complejidad de Kolmogoroff. Ma, de la Universidad Occidental de Ontario, se dedica a la bioinformática y al diseño de algoritmos.

ceden de “los Países Bajos” y contienen la frase “No se debe romperla por ningún motivo”.

Observamos a continuación un efecto que nos es familiar de la biología molecular: la variabilidad de las tasas de mutación de distintas partes del genoma. Los sitios activos de las enzimas apenas si mutan, mientras que las partes alejadas del punto activo experimentan sin cesar desviaciones aleatorias. Análogamente, las partes de las cartas imprescindibles para que conserven su sentido básico no mutan en absoluto, mientras que otras partes más arbitrarias, como los tipos de desdichas que recaerían en quienes no propagasen la cadena, mutan más. Las partes con escaso contenido intrínseco que ayude a detectar errores —por ejemplo, nombres poco corrientes, como “Gem Walsh” y “Carlo Craduit”— son las de mayor mutabilidad.

Otro fenómeno biológico que se da en las cartas encadenadas concierne a la aparición de mutaciones paralelas que se compensan entre sí: dos mutaciones que, sueltas, resultarían perjudiciales, pero que, de producirse a la vez, serán neutras o beneficiosas. A excepción de L12 y L26, en las que nadie muere, en todas las cartas anteriores al punto C (excepto la cercana L29) se lee:

El General Welsh [o una variación]
perdió su vida [*life*]... sin embargo,
antes de su [*his*] muerte...

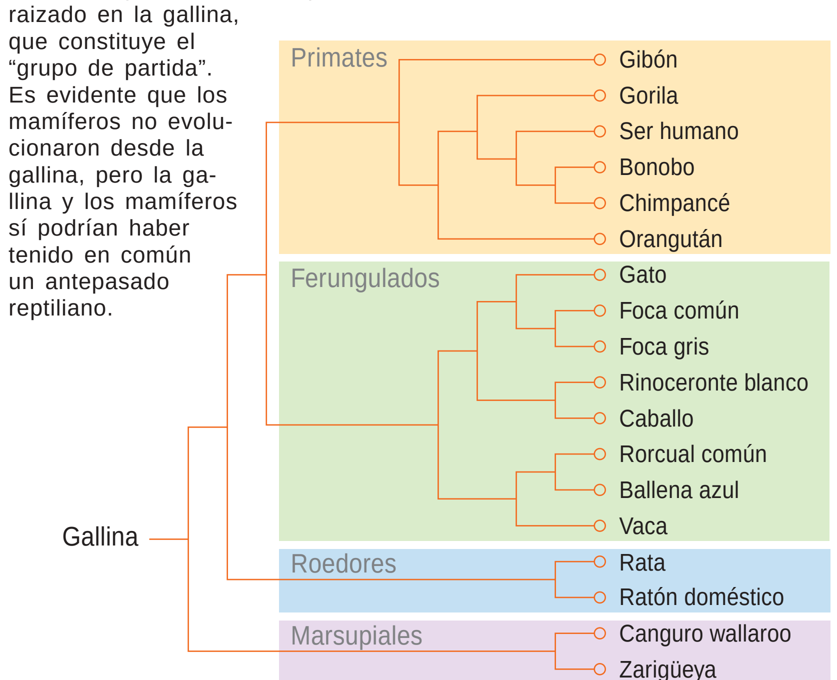
En cambio, las cartas posteriores al punto C dicen:

Gene Welch [o una variación] perdió
a su esposa [*wife*]... sin embargo,
antes de su [*her*] muerte [de la esposa]...

Para mantener el sentido, *his* (su, de él) se transmuta en *her* (su, de ella) cuando *life* (vida) se convierte en *wife* (esposa). (En el recuadro “La evolución de las cartas” se ofrecen más observaciones de este tipo.)

EL PARENTESCO DE LOS MAMIFEROS

La medida de parentesco ideada por los autores permite analizar problemas diversos. Al aplicarla a genomas mitocondriales completos produjo esta filogenia de los mamíferos. Observemos que los primates están en él más cercanamente emparentados con los ferungulados que con los roedores —lo cual se tiene por correcto—. Este grado de parentesco resulta ambiguo cuando se aplican técnicas tradicionales. El árbol está enraizado en la gallina, que constituye el “grupo de partida”. Es evidente que los mamíferos no evolucionaron desde la gallina, pero la gallina y los mamíferos sí podrían haber tenido en común un antepasado reptiliano.



Los mamíferos y el plagio

No sólo hemos analizado cartas encadenadas con nuestra medida de parentesco. La hemos utilizado también en la bioinformática propiamente dicha; hemos analizado los genomas mitocondriales de 18 mamíferos. Las mitocondrias son orgánulos que producen energía en el seno de las células; sus genes se heredan sólo de la madre (de modo similar a las cartas encadenadas, en las que transmite la “herencia” un único “progenitor”). Como en las mitocondrias no se entremezclan los genes maternos y los paternos, la acumulación de mutaciones en el genoma mitocondrial actúa a modo de reloj que midiera en qué momento divergieron de otras especies afines los antepasados de un organismo.

Los métodos tradicionalmente aplicados a los distintos genes mitocondriales producen a menudo árboles evolutivos contradictorios; además, a diferencia de nuestra nueva medida, no cabe aplicar con éxito muchos de esos métodos corrientes a un genoma entero: entraña múltiples dificultades, entre ellas las translocaciones. Por ejemplo, con los métodos tradicionales media docena de genes mitocondriales inducen a pensar que los primates —humanos incluidos— guardan un parentesco más estrecho con los roedores que con los ferungulados, un grupo variopinto en el que se encuentran las vacas, los caballos, las ballenas, los gatos y los perros. Otra media docena de genes implican que los primates y los ferungulados son el par más cercanamente emparentado, tal y como se tiene, en general, por correcto, habida cuenta de múltiples otras líneas probatorias (verbigracia, los genes no mitocondriales y los registros fósiles). Nuestro método,

SARA CHEN

aplicado a genomas mitocondriales completos, produce este segundo árbol evolutivo sin necesidad de manipulaciones de conveniencia tendentes a resolver ambigüedades o contradicciones (*véase el recuadro* “Parentesco de mamíferos”).

Dario Benedetto, Emanuele Caglioti y Vittorio Loreto, de la Universidad La Sapienza, de Roma, han llevado audazmente al extremo el arte de la inferencia filogenética al proponerse establecer la filogenia de los lenguajes humanos, no mediante el análisis de los elementos ya conocidos de la literatura o la historia de esos lenguajes, sino aplicando, tan sólo, un método similar al nuestro a 52 traducciones de la Declaración Universal de los Derechos del Hombre. El resultado fue sorprendentemente bueno, habida cuenta del diminuto cuerpo de elementos de juicio en que se basó. Un error notable consistió en la clasificación del inglés como lengua romance con un parentesco estrecho con el francés; históricamente, evolucionó en el seno del grupo germánico. Este error se debe a las muchísimas palabras francesas que el idioma inglés adquirió tras la invasión de los normandos (un ejemplo de transferencia paralela).

Otra aplicación de nuestra medida ha sido la detección de los plagios en los trabajos que los estudiantes deben realizar en casa. Encontró, por dar un ejemplo, dos ejercicios de una clase de programación informática más parecidos de lo normal, pero el instructor no vio ninguna prueba clara de que hubiese habido copia cuando los examinó por sí mismo. Llamados a capítulo los estudiantes, se les prometió, en interés de la investigación, inmunidad de la acusación de plagio a cambio de que explicasen sinceramente si había habido alguna colaboración entre ellos. Al parecer, habían hablado del problema y de cómo pensaban abordarlo, pero a partir de ese punto ya no habían trabajado juntos. Si fue así, nuestro algoritmo de distancia demostró su capacidad de detectar las sutiles semejanzas engendradas por aquella conversación.

La naturaleza automática de nuestro procedimiento constituye, al mismo tiempo, una ventaja y un inconveniente. Por una parte, proporciona respuestas objetivas sin necesidad de ponderar diversas líneas probatorias (como la comparación del ADN con los registros fósiles) o de tener en cuenta qué partes del genoma mutan más deprisa. Por otra, no se beneficia de la comprensión que pueda ganarse con los datos adicionales. No hay método de inferencia filogenética perfecto; cualquiera llevará en alguna ocasión a establecer una filogenia diferente de la real. Al igual que en historia y en paleontología, en biología molecular evolutiva se ha llegado a aceptar que, por muchas líneas probatorias que se consideren, la verdad completa sobre lo ocurrido en el pasado no se podrá reconstruir nunca. Esto es particularmente cierto con respecto a las especies extintas. Muchas no se conocerán jamás, por no haber dejado fósiles ni descendientes. De igual modo, han sido muchas las lenguas que se han extinguido, desapareciendo sin dejar rastro, incluso en el siglo pasado.

Por lo que se refiere a las cartas encadenadas, no cabe duda de que muchas llegaron a extinguirse: muchos rompían la cadena. Al igual que las tragedias perdidas de Sófocles, es posible que jamás consigamos recuperar los textos de estas cartas, y puede incluso que sólo quepa conjeturar su existencia a partir de pruebas circunstanciales.

Bibliografía complementaria

AN INTRODUCTION TO KOLMOGOROV COMPLEXITY AND ITS APPLICATIONS. Segunda edición. Ming Li y Paul M. Vitányi. Springer-Verlag, 1997.

AN INFORMATION-BASED SEQUENCE DISTANCE AND ITS APPLICATION TO WHOLE MITOCHONDRIAL GENOME PHYLOGENY. Ming Li, Xin Chen, Jonathan H. Badger, Sam Kwong, Paul Kearney y Haoyong Zhang en *Bioinformatics*, vol. 17, n.º 2, págs. 149-154; febrero de 2001.

LANGUAGE TREES AND ZIPPING. Dario Benedetto, Emanuele Caglioti y Vittorio Loreto en *Physical Review Letters*, vol. 88, n.º 4, páginas 048702-1-048702-4; 28 de enero de 2002.

El calafateo de los buques

Desde hace 7000 años, los navegantes vienen protegiendo el casco de las embarcaciones. El análisis descubre las mismas técnicas e idénticas sustancias en regiones muy distantes. Se aprecian indicios del uso de la pez tanto en las naves del Mediterráneo como en las del Atlántico

Jacques Connan

Las barcas, canoas, piraguas, chalupas, naves o cualesquiera embarcaciones, estén hechas de madera, cañas, ramas de palmera o corteza de árboles, son perfectamente estancas gracias a la labor de los calafates. Por desgracia, los tratados de construcción naval, aunque detallan a menudo con gran precisión el ingenio y la habilidad de tales operarios, raras veces indican los productos que utilizan. En 1990, Robert Aufan y François Thierry, de la Sociedad Histórica y Arqueológica de Arcachon y del País de Buch, hicieron una síntesis histórica de las resinas y recubrimientos utilizados al calafatear. El problema está en establecer el significado exacto de la gran variedad de nombres con que se designan tales productos en cartas, documentos de venta y de contabilidad, en edictos, leyes y decretos, así como en otros textos, pues es muy difícil saber con exactitud las sustancias concretas a que se refieren si desconocemos su composición química.

Con el fin de comprender mejor las diversas soluciones adoptadas por los constructores navales, hemos estudiado una gran variedad de muestras de productos de calafateo utilizados en el casco de buques de épocas muy distintas. Entre ellos destacan el pecio de una nave en Kuwait, naufragada hace 7000 años; el de otra que navegó por el océano Indico, de 4500 años de antigüedad; el pecio del Julio Verne VII, del siglo VI antes de nuestra era, que navegaba por el Mediterráneo; otro encontrado en el Saona, junto a Petit Creusot, el antiguo puerto de Chalon-sur-Saône, fechado en la segunda mitad del siglo primero anterior a nuestra era; el pecio de una nave de la marina imperial rusa naufragada en el Mediterráneo en 1780; y otros de muchas naves que navegaron por el océano Atlántico, el último de 1962. Con estos ejemplos conoceremos la labor de los artesanos que preparaban el producto de recubrimiento en calderos y dirigían la labor de la gente que elaboraba la estopa.

Para precisar el origen geográfico de las sustancias utilizadas en el calafateo de esas naves, estudiamos los recubrimientos, incluyendo el modo de producción, las condiciones térmicas de elaboración y el estado de conservación. Nuestro propósito era establecer por medio de estos estudios la composición molecular e isotópica de los productos orgánicos utilizados. Hemos examinado la aportación de los estudios arqueométricos, gracias a los cuales cabe reconstruir las técnicas de producción empleadas en el pasado. Sabemos así ahora que esas técnicas se han mantenido casi inmutables a lo largo del tiempo y del espacio; lo hemos podido observar en países muy distantes, que utilizan prácticamente los mismos materiales y los vienen tratando de igual manera a lo largo de los siglos. La pez usada por los calafates de la época romana, en el Mediterráneo, es la misma que aplicaban en los buques que iban a la pesca del bacalao a Terranova los de fines del siglo XIX y principios del XX; la única diferencia es que aquéllos, para conseguir la estanqueidad de las costuras de las tablas, embadurnaban telas

1. UNAS ANFORAS CON PEZ encontradas en el Mediterráneo. Formaban parte de la carga de una nave etrusca de fines del siglo V antes de nuestra era. Los recipientes son ánforas viejas de vino, reutilizadas para el transporte de la pez, con la que se calafateaban las naves. En una de las ánforas (*la de más arriba*), se ha puesto de nuevo el tapón de corcho embreado.


F. BASSEMAYOUSSE/COMEX

con la pez, mientras que éstos impregnaban con ella estopa. Y ese mismo procedimiento está todavía en uso hoy, tanto en Sables d'Olonne como en el golfo Pérsico y el océano Indico.

Calafateo: variantes principales

¿Qué significa el término calafatear? Según las enciclopedias y diccionarios náuticos actuales es la "operación que consiste en recalcar, por medio de una herramienta especial denominada hierro de calafate y a golpes de maza, una mecha de estopa en la costura de dos tablas contiguas —es decir, en el hueco existente entre ellas—, de modo que quede perfectamente obturada. A continuación, se cubre esa estopa con una mano de una mezcla de alquitrán, resina y brea, previamente calentada".

De todos modos, aunque la estopa es el material más empleado en el calafateo, realmente no es el único; a lo largo del tiempo se han usado otros y muy diversos. Así, en el ámbito de Rodas se utilizó, desde el Neolítico hasta fines del siglo XIX, el musgo que crece sobre los arbustos de boj; los egipcios emplearon el papiro; los constructores navales romanos, pedazos de tela bañados en pez; en Venecia usaron algas; los celtas optaron por las cañas chafadas y las fibras de corteza de árbol. Estos productos, que, introducidos a presión, rellenaban los intersticios, iban recubiertos de madera —varas de enebro en los calafateos con musgo del boj, por ejemplo—, de planchas de cobre o plomo, o de sustancias orgánicas impermeables. El calafateo se compone, pues, de dos fases. La primera es el relleno de los huecos; en la segunda se recubren los huecos ya taponados aplicando sobre ellos una mano de impermeabilizante. Los puristas reservan el término calafateo a la operación simple de dar estanqueidad al casco, sin incluir la protección que el mismo producto ejerce sobre la madera de los efectos del agua, del teredo o broma —molusco que vive y forma galerías en la obra viva del casco— o de los percebes (*Lepas anatifera*) que se adhieren a los objetos que flotan en el mar.

¿Qué son ese alquitrán, esa resina, esa brea o esa pez que se aplican sobre las costuras para conseguir la estanqueidad necesaria? La resina es la sustancia natural que segregan ciertos árboles. Por el contrario, el alquitrán, la brea y la pez son productos más elaborados, obtenidos de la combustión lenta de maderas resinosas (operación a la que se llama también destilación de la madera). El proceso consiste en llenar de madera un horno, que se cierra una vez encendido. A medida que se va consumiendo, la madera libera las sustancias orgánicas que contiene; se condensan sobre las paredes del horno y se recuperan, solidificadas, al final de la operación. El proceso permite obtener diversas calidades de destilados; la composición difiere entre sí en función de la temperatura del horno, cuya media es del orden de 250 ºC. Así, alquitranes, peces y breas figuran entre los productos de la combustión lenta de las maderas resinosas, a los que suele clasificarse en general como alquitranes de origen vegetal; aquí utilizaremos a veces la palabra alquitrán en esta acepción más amplia. (En castellano, brea nombra también una mezcla de composición variable, donde aparecen peces, breas, resinas, sebos y otras sustancias, o una tela así embreada; no emplearemos la palabra en estos sentidos, aunque sí el verbo embrear para referirnos al untado de la sustancia de calafatear.)

Una variante consiste en reemplazar la madera por hulla, y el resultado es un producto similar, el alquitrán de hulla, aunque el proceso requiere una temperatura notablemente más elevada. El bitumen o betún, que también se utiliza para calafatear, es un producto natural que aflora sobre la tierra. En Hit, en Irak, el petróleo llega a la superficie del suelo en forma de



2. LAS HERRAMIENTAS DE CALAFATE usadas por los operarios en los barcos de Saint-Malo que iban a la pesca del bacalao a los Grandes Bancos de Terranova. La pez es el residuo pastoso de la destilación de las maderas resinosas.

AMICALE DES OLONNOIS

El autor

JACQUES CONNAN es director de investigación asociado del Laboratorio de Substancias Naturales de Estrasburgo (CNRS) y experto en geoquímica orgánica de *TotalfinaElf*, en Pau.

gotas suspendidas en el seno de corrientes de agua salada. Estas gotas se aglutinan y forman una película que se va espesando hasta ponerse rígida. El producto sólido se recoge y funde —al igual que se hace con los obtenidos de la combustión de la madera o de la hulla—, para que sea líquido en el momento de aplicarlo al casco de los buques.

La gama de productos de calafateo

Palabras como pez o brea han tenido siempre un significado impreciso, que ha ido variando a lo largo del tiempo. La pez de la antigüedad procedía de los árboles resinosos, aunque los romanos usaban muy a menudo el término para designar tanto la resina que segregan de forma natural las coníferas como el producto de la destilación de la madera de esos árboles,



3. LA QUFFAH era una embarcación con forma de gran panera circular, hecha de hojas de palma trenzadas, que navegaba por el Tigris. La capa de betún, que en algunas partes se ha desprendido, aseguraba la estanqueidad de esta embarcación, dedicada al servicio de taxi hasta el año 1938.

4. SEGUN LAS REPRESENTACIONES contemporáneas que han llegado a nosotros, las naves asirias estaban hechas de haces de cañas o varas de ramas de palmera atadas. Muy probablemente iban recubiertas de betún, que es una materia prima muy difundida en Oriente Medio.

MUSEO NACIONAL DE LA MARINA/A. FUX (*arriba*); MUSEO BRITANICO (*abajo*)

de modo que las confusiones son inevitables. Además, la palabra brea se puede considerar como el nombre genérico de múltiples residuos de la destilación, o, al contrario, limitarla a las sustancias naturales producidas por los árboles resinosos. Se ha podido comprobar que estos recubrimientos, compuestos, por ejemplo, de betún, brea vegetal y grasa animal —de tiburón principalmente—, solían ir mezclados con otras sustancias, como la cal, el azufre y el aceite, o también con paja troceada. La paja proporcionaba un "esqueleto" a la sustancia que se formaba; los calafates habrían inventado así el primer material compuesto.

Hemos procurado simultanear en nuestras investigaciones el interés por los métodos destinados a proporcionar la debida estanqueidad y por los que protegen la madera de los efectos del agua de mar y de los organismos y microorganismos que se forman sobre los cascos. A menudo, el calafate hacía las dos cosas. Hemos estudiado la naturaleza de las materias orgánicas que aparecen en los productos de recubrimiento y demostrado que eran normalmente los mismos que encontrábamos en el casco, es decir, en las costuras de las tablas del forro o de cubierta, así como en la superficie interior del casco. En este último caso, no se trata de calafateo *sensu stricto*, ni tampoco de la estanqueidad del buque, sino de la protección del maderaje contra la putrefacción de la obra viva. Sin embargo, ese embreado favorece indirectamente la estanqueidad, pues retarda la aparición de vías de agua.

Esto se observa efectivamente en el pecio del *Marie Rose*, un navío de la flota de Enrique VIII de Inglaterra (reinó entre 1509 y 1545). Richard Evershed y sus colaboradores de la Universidad de Bristol han analizado los alquitranes usados por los calafates en los maderos de la obra exterior, la cubierta principal o los cables del ancla, incluso los almacenados en la bodega. Obtuvieron que siempre se trata del mismo producto, es decir, de destilados cuya composición se asemeja a la del alquitrán de Estocolmo, que se obtiene del pino silvestre.

Tras estas breves definiciones, pasemos al análisis de los resultados deducidos de pecios encontrados en Europa y en Oriente Medio, que ilustran las soluciones adoptadas, a partir del Neolítico, para lograr la estanqueidad de los cascos de las naves.

El betún en Oriente Medio entre el V° y el III^er^ milenio

Se han descubierto en Kuwait, en enero de 2001, unos rarísimos vestigios de embarcaciones del Neolítico reciente —hacia el 5000 antes de nuestra





JACQUES CONNAN

5. POR LAS HUELLAS DE LAS ESTERAS (***señaladas por la flecha***) **que aparecen en la mezcla bituminosa que recubría el casco de una nave fechada entre el 2500 y el 2000 a.C., ha sido posible la reconstrucción de las naves de cañas usadas en Omán durante la Edad de Bronce. Eran muy parecidas a las de ramas de palmera que navegan todavía hoy en Bahrein, en el golfo Pérsico** ***(las embarcaciones de la derecha no van calafateadas)*****.**

era—. Los han sacado a luz las excavaciones llevadas a cabo en la localidad de as-Sabiyah por Robert Carter y Harriett Crawford, de la Universidad de Londres. Los restos encontrados, que siguen siendo analizados, principalmente por Tom Vosmer, del departamento de arqueología moderna del Museo de la Marina de Australia, son fragmentos de compuestos bituminosos en los que aparecen elementos minerales; muestran la huella de cañas en una de las caras, y de percebes incrustados en el cuerpo del material en la otra cara. Estos residuos bituminosos se encontraron en una habitación de as-Sabiyah y al parecer eran productos de calafateo usados en las embarcaciones de cañas que se habían encontrado.

Serge Cleuziou, del Centro de Arqueología y Etnología de Nanterre, había encontrado también otros restos iguales en un pueblo de pescadores ocasionales, Ra's al-Jinz, en Omán. Estos dos ejemplos atestiguan la importancia que las poblaciones del V^{o}, IV° y III^{er} milenio concedían a esas mezclas bituminosas, susceptibles de ser fundidas muchas veces y aplicadas de nuevo a las embarcaciones para asegurar su estanqueidad y proteger las cañas del ataque de los teredos, o evitar el desgaste mecánico de las varadas en la playa. En aquella región y esa época, las embarcaciones, al parecer, estaban hechas de cañas, o quizá de los nervios centrales de las palmas.

Las naves de cañas han persistido hasta nuestros días en la marisma del delta del Tigris y Eufrates. Hoy, navegan todavía en Bahrein réplicas de idéntica factura, hechas también de varas de palmera (*véase la figura 5*). Las embarcaciones de cañas existían en Mesopotamia y Asiria desde el siglo IX antes de nuestra era, como puede comprobarse en las representaciones existentes en los bajorrelieves del palacio asirio de Assur-Narsipal II, en Nimrud, 30 km al sur de la actual ciudad de Mosul. S. Cleziou y Maurizio Tosi han identificado embarcaciones de idéntica factura que las de as-Sabiyah, pero hechas con tablas de madera, en Ra's al-Jinz, localidad de Omán, aunque pertenecen a la segunda mitad del III^{er} milenio anterior a nuestra era. En este caso, los haces de cañas de grosor variable iban sujetos entre sí, reforzados con una armazón de madera o de haces de cañas situado en el interior. El conjunto se recubrió con una estera de cañas, cubierta a su vez de una capa, de uno a tres centímetros de grueso, de una mezcla de carbonato de calcio y de betún. En este caso el betún procedía de Irak, lo que demuestra el extraordinario dinamismo de los intercambios de materias primas en el golfo Pérsico, e incluso más allá del estrecho de Ormuz, desde el III^{er} milenio.

Estos ejemplos de calafateo antiguo confirman que el betún era muy utilizado durante la antigüedad en Oriente Medio. En esa región, el betún abunda en el suelo y se emplea en diversos lugares como pegamento, elemento de estanqueidad o recubrimiento impermeabilizante. Las mejores obras estancas, y de mayor prestigio, fueron las de las terrazas de los jardines colgantes de Babilonia, o de otros palacios, como los de Nínive y de Assur. Por lo tanto, no es extraño encontrar allí el betún como agente de la estanqueidad de las embarcaciones ya desde el V^{o} milenio.





6. CALAFATEO CON ESTOPA. Son perfectamente visibles las mechas de ese material que salen de los intersticios donde habían sido introducidas a presión. Cuando la embarcación estaba en el agua, la madera se hinchaba, comprimiendo la estopa en las juntas, lo que aseguraba la estanqueidad. La estopa iba recubierta a veces con una capa de almáciga de vidriero o de productos bituminosos (*en negro, en las fotos*), como testifican estos cascos existentes en el cementerio de barcos de Fret, en la península de Crozon, que datan de la década de 1960.

JACQUES CONNAN

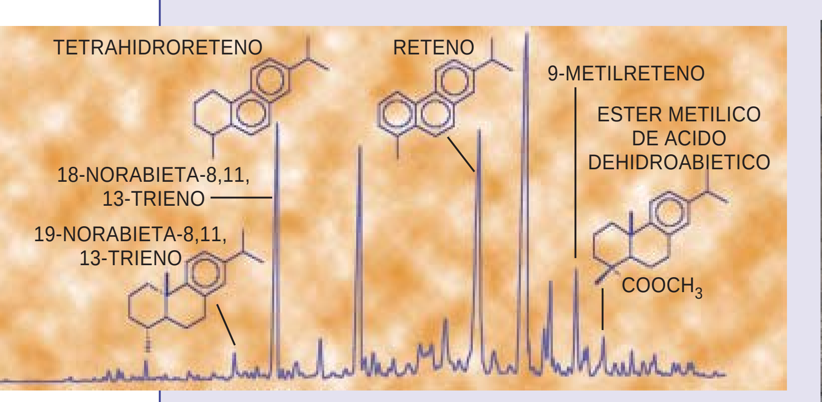
Esta tradición ha llegado hasta nuestros días en la *quffah*, una embarcación del Tigris, uno de cuyos ejemplares está expuesto en el Museo de la Marina de París (*véase la figura 3*). Estas *quffahs* eran unas cestas circulares muy grandes hechas de hojas de palma trenzadas y reforzadas con cordeles; la técnica empleada se inspira directamente en el arte de la cestería. A principios del siglo XX, las embarcaciones de esta clase prestaban todavía un servicio de "taxi" y se usaban también para el transporte de mercancías. Se construyeron hasta el año 1938. La mano de mezcla bituminosa que le proporcionaba estanqueidad se aplicaba en caliente.

Al parecer, el calafateo con betún lo usaban también los fenicios, para cuyas embarcaciones recubiertas de cobre recurrían al betún del mar Muerto, el betún de Judea. Esta información, aportada por la literatura, no ha sido confirmada por los análisis, aunque es verosímil, pues el uso del betún del mar Muerto estaba muy difundido por toda aquella región. Sin embargo, los fenicios tenían a su disposición otras fuentes de betún, como por ejemplo las existentes en la región de Hasbeya, en el Líbano actual, cerca de Tiro y Sidón.

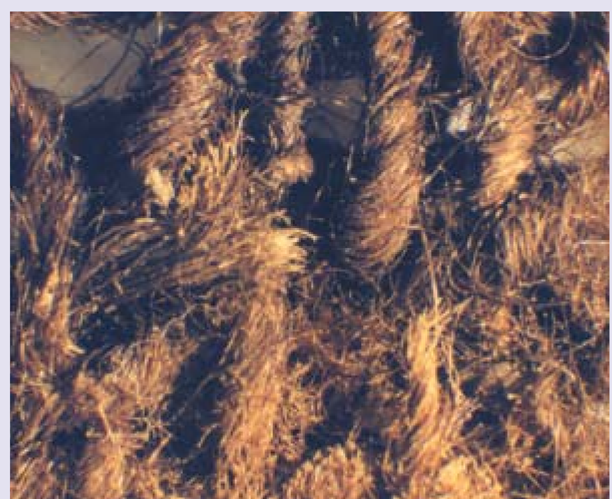
En el Egipto antiguo, al contrario que en el Próximo Oriente, el betún no se utilizaba para el calafateo de las embarcaciones. Según R. Aufan y F. Thierry, usaban la estopa y el papiro embreado para cerrar los in-

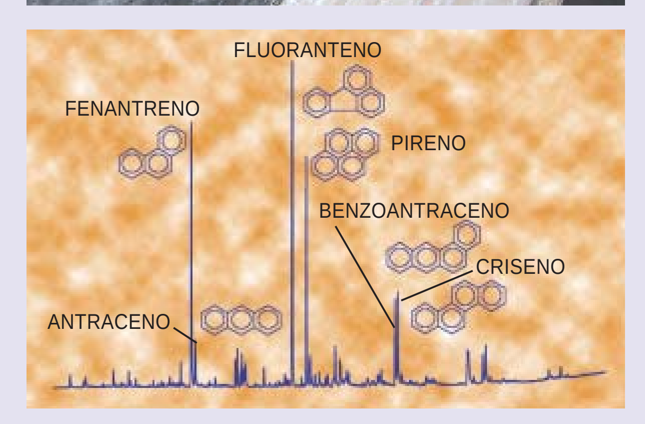
ANALISIS QUIMICO DE LOS MATERIALES DE CALAFATEO

Analizamos varios restos de calafateo, en especial un tejido de lana embreado, procedente del puerto antiguo de Petit Creusot, y fechado en el siglo III de nuestra era. Eran de pez, como lo evidencia la identificación de los componentes derivados del ácido abiético en la fracción de "hidrocarburos aromáticos", extraídos por el diclorometano de diversas muestras. También analizamos el recubrimiento de una embarcación de la década de 1960, utilizada por los criadores de ostras de la isla de Oléron; consistía en un alquitrán negro procedente de la hulla —obtenido a una temperatura muy elevada, entre 900 y 1200 ºC—, que se caracteriza por ser una fracción aromática rica en poliaromáticos típicos de los productos de pirólisis: el fenantreno, el antraceno, el fluoranteno y el pireno, entre otros. En este caso, la discriminación molecular está muy contrastada y se han identificado fácilmente las dos grandes familias de recubrimientos a las que pertenecen las muestras analizadas.









EL CONOCIMIENTO DE LOS MATERIALES DE CALAFATEO ha sido posible gracias a los "diagnósticos" químicos. Así se han identificado las moléculas orgánicas de la fracción correspondiente a los hidrocarburos aromáticos extraídas de los cubrimientos de calafateado por el diclorometano. Las sustancias obtenidas de las telas embreadas (*a la izquierda*) de las naves romanas de Chalon-sur-Saône, y fechadas en el siglo I, contienen pez, según atestiguan los diterpenoides derivados del ácido abiético. Por el contrario, el producto empleado en una barca ostrera de la isla de Oléron, de la década de 1960, revela un conjunto de moléculas poliaromáticas, en las que predominan el fluoranteno y el pireno característicos del alquitrán de hulla, es decir, de la obtenida del carbón de piedra a alta temperatura, comprendida entre los 900 y los 1200 ºC (*a la derecha*).

tersticios del casco de las barcas de papiro y de las embarcaciones de madera de acacia, como han podido comprobar en las encontradas en algunos sitios funerarios. Las embarcaciones que no iban calafateadas llevaban los intersticios llenos de cordeles; así, cuando el casco se dilataba al impregnarse de agua, los cordeles se comprimían y taponaban las juntas. Esto permite comprender que en el Egipto faraónico, que no fue jamás una civilización vinculada al betún, al contrario de las contemporáneas que florecían en Siria, Irak, Irán y golfo Pérsico, no se usara para el calafateo de las embarcaciones. El betún era un producto raro en Egipto, pese a la existencia de indicios en algunos lugares del mar Rojo y del Sinaí, y se utilizaba principalmente en los trabajos de momificación. El comercio de esa materia con Egipto, muy lucrativo, lo controlaban los nabateos. Cuando Cleopatra les suprimió ese privilegio, los nabateos, como represalia, le quemaron la flota en el puerto de Alejandría. El empleo del betún se difundió en el golfo Pérsico —Kuwait, Bahrein— a partir, más bien, de Mesopotamia en el IV° y III^{er} milenio, y luego, desde la expansión islámica, a partir de Irán.

Fuera de Oriente Medio, el calafateado con betún no fue la regla en el mundo antiguo. Hubo que esperar a la era industrial para que el betún y el alquitrán de hulla apareciesen sobre los cascos. Los países mediterráneos recurrieron a otros tipos de productos: resinas, gomas y alquitranes vegetales extraídos de las coníferas y de lentiscos o terebintos (que rezuman resinas).

La pez en la antigüedad

Muchos de los productos de recubrimiento eran sustancias naturales —resinas, masilla o almáciga y gomas—; los derivados se fabricaban por destilación de maderas resinosas, según hemos comentado anteriormente. La pez, cuya fabricación describió ya Plinio el Viejo, se comercializaba en el Mediterráneo desde el siglo VI antes de nuestra era, como lo atestiguan los cargamentos de ánforas recubiertas con restos de ese producto encontradas en los pecios. Había cargamentos de muchas toneladas formados por las partidas de alquitranes o pez, es decir, de los productos obtenidos del tratamiento térmico de las maderas resinosas. Estos productos, que eran más o menos viscosos en el momento del embarque en las naves, aparecen hoy solidificados en las ánforas donde se llevaban, por haberse evaporado los componentes más ligeros.

En la edad antigua, las naves destinadas a la navegación por el Mediterráneo o por ríos y aguas interiores iban calafateadas. Los *unctores* se encargaban de aplicar unas manos de producto a los cascos para proteger la madera y asegurar su estanqueidad. Del estudio de la embarcación monóxila remontada (una canoa de tronco ahuecado con tablas aplicadas a los costados para aumentar su altura y capacidad) de Chalon-sur-Saône, de la segunda mitad del siglo I, se sigue que el método empleado consistía en introducir entre las tablas a presión, durante la construcción, una tira retorcida de tela untada con pez. Hay constancia de que telas embadurnadas con pez protegían la madera de las naves mediterráneas. Se han descubierto numerosos restos de telas embreadas (*véase la figura 7*), procedentes de las excavaciones del puerto de Marsella, así como del puerto antiguo de Petit Creusot.

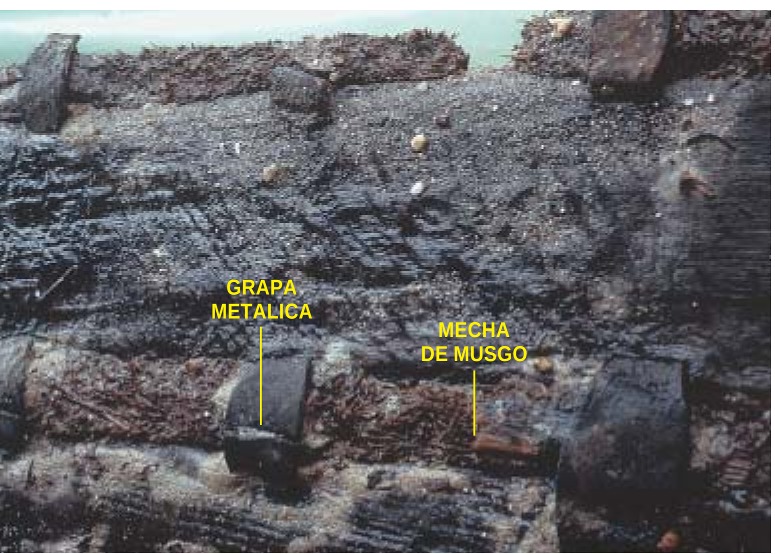
La pez no siempre se utilizaba sola, sino que solía ir acompañada de otros ingredientes, como la cera de abeja, por ejemplo. Esto es lo que descubrimos al analizar el calafateo del casco de un pecio de la Grecia arcaica, fechado en el siglo VII anterior a nuestra era. Confirma las afirmaciones de Plinio el Viejo, quien designa ese compuesto de cera y pez como zopisa. En su *Historia natural*, redactada entre los años 23 y 79, escribió: “Ya hemos dicho en otro lugar que existía la costumbre de recuperar la zopisa del casco de las naves, rascándolos. Se trata de una mezcla de pez y de cera que ha macerado en el agua de mar. La mejor es la procedente de las naves al regreso de su primer viaje. La zopisa entra en la composición de las cataplasmas emolientes que quitan los abscesos.” Plinio el Viejo no precisa la naturaleza de la cera, pero no deja ninguna duda sobre su utilización de la mezcla en los cascos de las naves; él era el prefecto de la flota de Miseno cuando se produjo la erupción del Vesubio del año 79, que le produjo la muerte, seguramente a causa de la asfixia o quemado por las humaredas ardientes, cuando intentaba prestar ayuda a las víctimas de la erupción.

Los resultados expuestos se desprenden del estudio de una decena de cargamentos de resinas obtenidos de pecios fechados entre los siglos VI antes de nuestra era y el siglo X después de ella. Sólo se ha encontrado resina en bruto de conífera en un pecio, el de la bahía de Pampelone, junto a Saint-Tropez, del siglo IV. Allí se halló una cantidad de resina en una ánfora africana, pero el cargamento no era de pez. Según Luc Long, conservador en jefe del patrimonio del departamento de Investigaciones Arqueológicas Subacuáticas y Submarinas, el DRASSM, de Marsella, el contenido del ánfora formaba parte de las provisiones de a bordo y estaba reservado, sin duda, a las reparaciones de fortuna que realizaría la tripulación; no se trataba de ningún cargamento de pez destinado al calafateo de naves.

El comercio de la pez no estaba limitado al Mediterráneo, donde los pecios de naves romanas que la transportaban en ánforas son muy numerosos, sino que se practicaba también en el Atlántico, según demuestra el cargamento encontrado en Guernesey, en una nave hundida en el puerto de Saint-Peter hacia el año 280. El cargamento, formado por muchas toneladas de pez, iba en barriles de madera, en vez de en ánforas, como era usual en el Mediterráneo. Las características del envase sugieren un origen puramente atlántico del producto, que quedó confirmado al descubrirse que se produjo en las Landas, con una composición exactamente igual a la que hacían los resineros galorromanos de Losa, al sur de Arcachon.

Según Plinio el Viejo, la pez se producía en muchas regiones de la cuenca mediterránea: en Asia





7. LAS TECNICAS DE CALAFATEO disponibles eran varias. En época romana, las naves se calafateaban con tela embreada (*arriba*). Los pedazos de tela se introducían a presión en los intersticios del casco y a continuación se cubría el conjunto con pez, lo que aseguraba la estanqueidad. Se practicaba también el calafateo con musgo. En un barco de roble de Ouroux-sur-Saône —hacia el 1400—, la estanqueidad se conseguía mediante mechas de musgo —probablemente el que vive en el boj—; las tablas de madera iban sujetas con unas grapas metálicas espaciadas una decena de centímetros (*abajo*).

L. BONNAMOUR, MUSEO DENON, CHALON-SUR-SAÔNE

Menor, Grecia, Rodas, España, Francia —concretamente en el interior de Provenza—, Líbano, Chipre e Italia. En lo concerniente a Francia, la producción no se limitaba a las regiones mediterráneas, sino que se extendía por todo el país, según confirma el hallazgo de calderos de cobre y vasijas de barro cocido empleados en la elaboración de la pez en época galorromana en Causses, Vosgos, Lozère y las Landas. Esta actividad artesanal parece haber sido muy importante en Francia, desde la antigüedad hasta nuestros días, pues los hornos artesanales dedicados a ella seguían funcionando todavía en 1950. En las regiones mencionadas, ricas en bosques de árboles de resina, la madera se utilizaba para hacer carbón vegetal, que consumían en las forjas, y la pez destinada al calafateo de las naves y el embreado de la jarcia, que se usaba en los arsenales.

En el siglo XVII, la demanda era tan considerable, que la producción francesa no bastaba para satisfacerla, lo que obligó a importarla del norte de Europa, y principalmente de Estocolmo. El crecimiento del consumo era debido a la generalización del empleo de cabos embreados y del calafateo de las naves. El empleo de la resina natural para proteger el interior de los cascos parece ser que no llegó a imponerse, pese a los intentos del marqués de Langueron, inspector general de constructores navales, y a la orden cursada a los intendentes de la Marina en 1687. En definitiva, el producto predilecto era la pez. El alquitrán de conífera —pez o brea— fue un producto estratégico durante los siglos XVII y XVIII, cuando, a instancias de Colbert, la Marina francesa empezó a descollar.

El análisis químico de los productos de calafateo

Las técnicas geoquímicas puestas a punto para la exploración petrolífera, debidamente adaptadas, han servido para el estudio de las piezas arqueológicas y de las sustancias que se extraen por medio de un disolvente, el diclorometano. Estas sustancias se dividen en diversas fracciones, que se analizan seguidamente. La información molecular proporcionada por esas fracciones constituye lo que actualmente se conoce como arqueología molecular. Entre las materias orgánicas analizadas, buscamos unos componentes específicos, tales como betún, alquitrán de madera, cera de abeja, pez e incluso resina. Encontramos a veces algunas mezclas muy complejas, hechas con ingredientes muy diferentes —betún y alquitrán de hulla, cera de abejas y pez, betún y alquitrán de coníferas, por ejemplo—. Algunas deformaciones de los conjuntos moleculares permitieron reconocer la existencia de fenómenos de alteración, debidos principalmente a la oxidación de las materias causada por los agentes atmosféricos, tales como el aire, el agua y la luz.

Muy recientemente, la química isotópica ha completado las informaciones moleculares con la aportación de los valores isotópicos del carbono y del deuterio. Las relaciones isotópicas del hidrógeno (la del deuterio con el hidrógeno) y del carbono (la del carbono 12 con el carbono 13) varían según el origen y la degradación de la pez. Estos datos complementarios proporcionan unos criterios irreemplazables que permiten identificar el origen de los productos, tanto de los betunes como de las peces, aun cuando sus composiciones son muy parecidas. Al igual que el geoquímico orgánico que estudia el petróleo, el arqueólogo molecular utiliza dos vías de investigación: la química molecular y la isotópica, que le permiten clasificar la pez y demás alquitranes vegetales, las resinas de coníferas u otras esencias, e incluso el betún.

A la luz de los análisis obtenidos, complementados con los datos aportados por la literatura, resumamos los conocimientos adquiridos sobre el calafateo. Su uso debió de ser muy generalizado, con embreado o sin él, en todas las construcciones hechas de mate-

riales ensamblados. Algunas modalidades, como el calafateo con musgo de boj, el recubrimiento con betún o incluso la aplicación de estopa embreada con pez, se usaban ya en el Neolítico y han seguido empleándose hasta nuestros días. Otras han sido abandonadas, como el uso de tela untada de pez, por ejemplo, o sustituidas por otras modalidades, como la aplicación de un forro de cobre sobre el de madera. Los materiales más modernos, como el alquitrán de hulla, empezaron a usarse en los cascos de los buques hacia 1830. En 1950 la almáciga de los vidrieros la reemplazó; con ella se cubría la estopa tradicional, alquitranada con pez. Esa almáciga es un compuesto de blanco de España, es decir, de creta en polvo mezclada con aceite de linaza.

En definitiva, el calafateo no ha experimentado mutaciones muy notables a lo largo del tiempo; el que se realiza hoy en día en los astilleros que construyen barcos de madera es la culminación de los procedimientos de muchas generaciones de calafates.

Bibliografía complementaria

MODEL OF A THIRD MILLENNIUM BC REED BOAT BASED ON EVIDENCE FROM RAS'S AL-JINZ. T. Vosmer, en *The Journal of Oman Studies*, volumen 11, págs. 149-151, 2000.

UN USAGE OUBLIÉ DE LA MOUSSE: LE CALFATAGE DE BATEAUX. L. Bonnamour, en *La Garrance voyageuse*, vol. 49, págs. 6-9, 2000.

3000 ANS D'ÉVOLUTION DES BATEAUX DE SAÔNE. L. Bonnamour, en *Archéologie de la Saône, le fleuve gardien de la mémoire*. Éditions Errance, págs. 53-63, 2000.

DEUX BATEAUX ANTIQUES. C. Lachambon, en *L'archéologie*, n.º 54, págs. 33-36, 2001.

L'ARCHÉOLOGIE MOLÉCULAIRE ET ISOTOPIQUE: ÉTUDE DES BITUMES, BRAIS ET GOUDRONS DE BOIS. J. Connan, en *Géologie de la Préhistoire; méthodes, techniques, applications*, dirigido por J.-C. Miskovsky, Association pour l'étude de l'environnement géologique de la préhistoire, Maison de la Géologie, París, págs. 1045-1066, 2002.

Wolfgang Bürger

Conducir sin manos

El número del cable metálico: El imprescindible señor Sperber, siempre en su puesto para la clase de las ocho, acercó al profesor una bicicleta de juguete. El pequeño modelo tenía, como ruedas sin llanta, dos poleas —podían proceder quizá de un mecano— y, a diferencia de las bicicletas "normales", un eje de dirección vertical. El profesor Pohl sujetó ambas ruedas, presionándolas, sobre un disco giratorio, y colocó este profesoral vehículo en un largo cable metálico, tensado a través del gran paraninfo de la facultad de física de la Universidad de Gotinga. Sin que lo condujese nadie, el biciclo se desplazó a una velocidad, habida cuenta de las proporciones, considerable, bien erguido sobre el cable hasta que, antes de llegar al final, lo recogiese un ayudante.

Para explicarlo, el profesor, ante la mirada de los más de cuatrocientos espectadores presentes en la sala, hizo otra vez girar las ruedas de su juguete a grandes revoluciones e inclinó la pequeña bicicleta en torno a su eje longitudinal, hacia la derecha. Inmediatamente, la rueda delantera adquirió también la posición de girar a la derecha, como si quisiera anticiparse al vuelco. Debido al eje de dirección perpendicular, la reacción de la rueda delantera al vuelco no se podía deber a un sobrepeso de la horquilla de la rueda delantera, como en una bicicleta normal. En equilibrio estático, el giro sólo podía deberse a la precesión giroscópica de la rueda delantera. De ahí el comentario del profesor: "Sobre el suelo, esta miniatura se desplaza inmejorablemente en línea recta. No hace la menor falta que la guíe nadie. El ciclista pone muy poco de su parte en la conducción sin manos: sólo tiene que aprender a no estorbar el movimiento de precesión que aparece al instante en la rueda delantera". Tras los aplausos de los estudiantes, Pohl podía estar seguro de que había convencido a sus oyentes de la intervención de "las fuerzas giroscópicas".

Si el profesor hubiese dejado que la bicicleta fuera sólo la mitad de rápido, habida cuenta de que esas fuerzas en la rueda delantera son más débiles a velocidad lenta, ¿se habría mantenido de pie? ¿Cómo consiguen unas fuerzas giroscópicas que siga de pie una bicicleta que tiene su centro de masas por encima del "eje de giro momentáneo", que pasa por los puntos de contacto con el suelo de las dos ruedas? En cuanto se reprime la precesión giroscópica de la rueda delantera, bloqueando la dirección en la posición de línea recta, la bicicleta se vence hacia la izquierda o hacia la derecha, giren las ruedas a la velocidad que giren.

El eje de dirección pasa justo por el pie, B, de la rueda delantera

THOMAS BRAUN/SDW

El hombre en el circuito regulador: Si nos fijamos en los niños que aprenden a montar en bicicleta, ir sin manos no nos parecerá tan fácil. A velocidades muy bajas —en las que el "momento giroscópico" de la rueda delantera no tiene importancia en comparación con el momento del peso, que no depende de la velocidad de la marcha—, se necesita alguna experiencia para dominar la bicicleta sin agarrar el manillar. El ciclista mismo tiene que convertirse en un regulador y compensar con el cuerpo el balanceo de su máquina. No podrá ir ya en línea recta sin tambalearse: un ser humano tarda en reaccionar y responde como regulador, con un impulso corrector, sólo cuando se da cuenta de que el "es" se aleja del "debe ser".

Geometría de la dirección: En las bicicletas corrientes, el eje de dirección no es vertical, como en el modelo de Pohl, sino que se inclina unos 15 grados hacia el conductor. La horquilla de la rueda delantera está torcida ("acodada") en su extremo inferior lo justo para que el punto de incidencia del eje de dirección en el suelo coincida cuanto sea posible con el punto de contacto de la rueda delantera con el suelo (un "avance del pivote de la rueda" 0; *véase la figura de la izquierda*) ¿Es gracias a ello más seguro montar en bicicleta? No necesariamente, pero sí más cómodo. El codo de la horquilla de la rueda delantera y su estrechamiento hacia delante dan elasticidad y ayudan a amortiguar los golpes del suelo. El avance del pivote facilita la conducción al reducir la fuerza de reacción del suelo. La inclinación del eje de dirección hacia el ciclista hace más cómoda la utilización del manillar. No puedo encontrar una razón más profunda en todas estas mejoras constructivas. En la *Enciclopedia Británica* se lee, bajo la entrada "bicycle", que, gracias a la geometría del manillar, el baricentro de la bicicleta (comprendidos el ciclista y su equipaje) queda en su posición más baja cuando la bicicleta se conduce en línea recta. Si esto fuera así, tras un golpe la dirección volvería por sí sola a la posición del avance en línea recta. Pero como David E. H. Jones ha calculado con sus bicicletas experimentales, esto no es cierto.

El juego del aro: Si se reduce la bicicleta a su mínima expresión, se obtiene un juego al que los niños antes jugaban en nuestras calles y que hoy aún se ve en algunos países africanos: se hace rodar un aro de madera grande y ligero con una varita, y se lo vuelve a impulsar una y otra vez, siempre que amenace con caer, cansado por la fricción al rodar. No rueda en línea recta, sino describiendo una leve línea ondulante; de igual manera que un giroscopio, ha de "precesionar" para no caer; si no, habría de mantenerse vertical apoyado sólo en su borde de un centímetro.

Física de la conducción sin manos

No mueva el manillar. ¡Vaya rápido!

Sea un sistema de coordenadas cartesiano que se desplace con la rueda anular, pero que no gire con ella. Los ejes x e y están en el plano de la rueda. El eje x apunta siempre hacia arriba, el y horizontalmente, en el sentido de la marcha, el z es perpendicular al plano de la rueda (cabe imaginarlo unido a ella).

La rueda se inclina un ángulo θ respecto a la vertical; así que θ es el ángulo entre el eje x y la vertical al mismo tiempo que entre el eje z y la horizontal. Como es pequeño, podremos aplicar la aproximación $\operatorname{sen} \theta \approx \theta$ y $\cos \theta \approx 1$. Además, el sentido de la marcha de la rueda (la tangente de su trayectoria) se desvía cierto ángulo respecto a una dirección de referencia fija. Finalmente, sea ϕ el ángulo de su giro alrededor del eje z solidario. La velocidad angular será $\omega = d\phi/dt$.

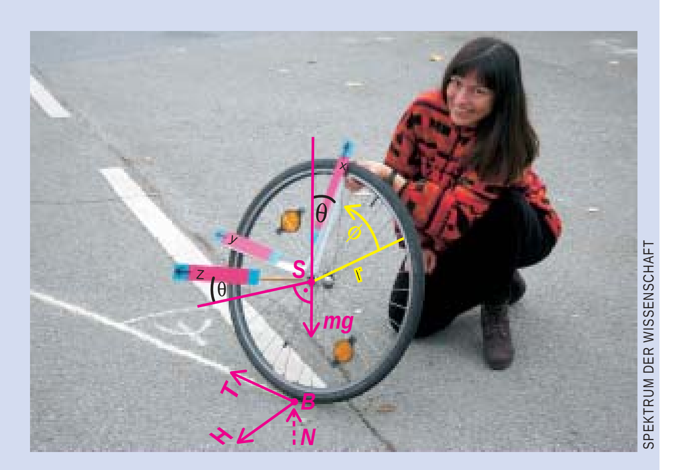
J e I serán respectivamente los momentos de inercia de la rueda para un giro alrededor del eje z y alrededor de cualquier eje perpendicular a z, como x o y. Como la masa m del anillo de la rueda está situada en un mismo plano y repartida con simetría radial alrededor de su punto medio, su momento de inercia alrededor del eje z tiene el valor $J = mr^2$ (r es el radio del anillo). El momento de inercia alrededor de cualquier eje perpendicular es justamente la mitad: $I = J/2$.

Ecuaciones para el centro de masas: El movimiento de la rueda es un giro puro. No salta, no resbala, no se hunde en el suelo. Así que en el pie B actúan fuerzas de contacto que evitan todo eso: N contra el hundimiento en el suelo y T y H contra el patinar hacia delante y hacia un lado respectivamente. Ya que tampoco se eleva, reina un equilibrio de fuerzas en la dirección de x ($N - mg - H\theta = 0$); las componentes de las fuerzas se deducen (utilizando las aproximaciones anteriores para θ) a partir del gráfico. Además, el centro de masas S de la rueda anular será acelerado por las fuerzas de contacto en el pie y por su peso mg. En la dirección de y valdrá que $mr\,d\omega/dt = T$. En la dirección de z el centro de masas de la rueda anular experimenta una aceleración según la trayectoria $-rd^2\theta/dt^2$ (al vencerse alrededor del eje y), así como una aceleración centrípeta $r\omega\,d\psi/dt$ (al girar en torno al eje x). La suma de estas aceleraciones, multiplicada por la masa m, es igual a la fuerza resultante sobre el centro de masas en la dirección de z:

$$m\left(-r\frac{d^2\theta}{dt^2} + r\omega\frac{d\psi}{dt}\right) = (N - mg)\theta + H \qquad (1)$$

(g es la aceleración de la gravedad).

Ecuaciones del giroscopio: Al rodar la rueda en la dirección de y, el momento angular $J\omega$ alrededor del eje z varía debido a la acción del momento de la fuerza T ($J d\omega/dt = -rT$). De la ecuación del centro de masas para la dirección de z se puede eliminar la fuerza T, con el resultado $d\omega/dt = 0$. La rueda gira así con velocidad constante $v = r\omega$; no está, pues, sometida a fuerza alguna en dirección de y: $T = 0$. La variación del momento angular en la dirección de x tiene una parte local, $Id^2\psi/dt^2$, y una parte convectiva $J\omega d\theta/dt$, que se debe a que, al vencerse la rueda en torno al eje y, una parte del momento angular asociado al giro de la rueda en torno a z, $J\omega$, gira en dirección de x. Como no actúa sobre el anillo de la rueda ningún momento de fuerzas en dirección de x, se puede deducir a partir de la ecuación giroscópica $Id^2\psi/dt^2 + J\omega\,d\theta/dt = 0$ para



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

la dirección de x que el momento angular D_x en torno a dicho eje es una constante del movimiento:

$$D_x = I\frac{d\psi}{dt} + J\omega\theta \qquad (2)$$

El momento de fuerzas en torno a y origina correspondientemente tanto una variación local ($Id^2\theta/dt^2$) como una convectiva ($-J\omega\,d\psi/dt$) del momento angular, cuya suma es igual al momento de fuerzas que actúa. La ecuación giroscópica para la dirección de y será:

$$I\frac{d^2\theta}{dt^2} - J\omega\frac{d\psi}{dt} = r(N\theta + H) \qquad (3)$$

De las tres ecuaciones numeradas, eliminando N, H y $d\psi/dt$, se obtiene una ecuación para el ángulo de inclinación θ. Si en ésta se sustituye $J = mr^2 = 2I$, y hacemos que el anillo arranque sin momento angular vertical ($D_x = 0$), se obtiene para el ángulo de inclinación de la rueda la ecuación diferencial

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{8}{3r^2}\left(v^2 - \frac{gr}{4}\right)\theta = 0. \qquad (4)$$

Para la velocidad v, en el caso en que el factor que multiplica al ángulo en el segundo término de la ecuación sea positivo ($v^2 > gr/4$), tiene como solución una oscilación sinusoidal. Entonces la rueda girará como una peonza y no caerá.

Para el aro de un niño ($r = 0{,}4$ m, $g = 10$ m/s^2), la velocidad v tiene por ello que ser mayor que 1 m/s = 3,6 km/h (la velocidad a que anda un peatón), independientemente del peso del anillo. La excursión del anillo será de duración ilimitada si la pérdida de energía (aquí despreciada) al rodar se repone continuamente con un impulso.

¿Y la bicicleta? Para estimar la velocidad crítica v de una bicicleta, sobre cuya rueda delantera, además de la masa m de la propia rueda, presiona el cuadro con un peso ineludible más otro adicional M, sólo se tendrá en cuenta esta masa adicional. La bicicleta y su carga se estabilizan si $v^2 > (1 + M/m)gr/4$. Da, con unos estimados $m = 3$ kg y $M = 45$ kg de carga, una velocidad $v > 4{,}0$ m/s = 14,4 km/h (una marcha no muy lenta tratándose de un ciclista) para que las fuerzas giroscópicas puedan mantener erguido el vehículo espontáneamente.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M.R. Parrondo

Un mundo sin números

"El libro de la Naturaleza está escrito en caracteres matemáticos." Así formulaba Galileo el principio fundacional de la física contemporánea, que se ha extendido más tarde a la ciencia en general y hasta a la vida cotidiana. Hoy da la impresión de que el único conocimiento válido y objetivo es el cuantificable. El debate político parece errático y vago si no se apoya en cifras económicas y sociológicas. Para explicarnos los efectos de una operación o de una terapia, el médico utiliza la probabilidad y la estadística. La máxima de Galileo tiene más vigencia que nunca: los números y las matemáticas se encuentran por doquier y están ahí para describir y explicar el mundo.

Sin embargo, la mayoría sigue teniendo grandes dificultades para aprender matemáticas. Esa dificultad no proviene sobre todo de una falta de aptitudes. Niños con problemas en matemáticas son capaces de asimilar y utilizar reglas de algunos juegos más complejas que las que rigen el cálculo elemental. En la mayoría de los casos, la dificultad proviene más bien de un cierto estupor que se apodera de nosotros en nuestro primer contacto con las matemáticas. El estupor de no entender qué tienen que ver los números con el mundo que nos rodea. Las matemáticas no son un juego, sirven para algo, y, sin embargo, el niño las percibe, y con razón, como algo completamente ajeno a su mundo, en flagrante contradicción con la máxima de Galileo.

Las matemáticas, el pensamiento matemático, ejercen una "violencia" sobre el pensamiento del niño, o de cualquiera que se acerque a ellas. Un ejemplo ilustrativo son los números negativos, la primera gran abstracción de la matemática, o, en palabras de Klein, "el paso de las matemáticas concretas a las formales". Para enseñar los números negativos a un niño, podríamos diseñar un juego en donde un dado hiciese avanzar una ficha y otro la hiciera retroceder; le explicaríamos que es lo mismo "retroceder 5 casillas" que "avanzar –5 casillas". El problema es que el niño puede entender esto como un juego de palabras absurdo, una complicación innecesaria, y comience a crearse en él la idea de que existe una distancia insalvable entre la vida y las matemáticas.

¿Tiene razón nuestro alumno suspicaz? ¿Para qué decir "avanzo –5" en lugar de "retrocedo 5"? Nosotros sabemos que la verdadera potencia de los números negativos radica en que nos permiten describir el movimiento de la ficha con un solo verbo: "avanzar". Sin embargo, para el niño la vida está en las palabras, no en los números. Quitar palabras para dejar espacio a los números o a los símbolos es un acto de violencia intelectual, una andanada contra nuestro sistema cognitivo más básico y natural. La educación matemática de hoy en día no tiene en cuenta muchas veces esta violencia; está obsesionada con el aprendizaje de conceptos formales a una edad demasiado temprana, cuando los niños no pueden entender su potencia y utilidad. Por eso muchos acaban teniendo la sensación de que las matemáticas "no son lo suyo".

Si Galileo estuviera en lo cierto, si las matemáticas fueran el lenguaje necesario para entender el mundo, todos haríamos un esfuerzo considerable por aprenderlas. Si usted va a pasar el resto de su vida en China, dedicaría gran parte de su tiempo y de su energía a aprender chino, por muy difícil que sea o por muy mal que se le den los idiomas. Además, en poco tiempo poseería ciertos rudimentos de chino, puesto que en su vida diaria tendría que aplicar constantemente lo aprendido. La utilidad de lo estudiado en el aula sería evidente en cada momento de su vida cotidiana. Sin embargo, con las matemáticas no ocurre lo mismo. Ocurre, de hecho, todo lo contrario. Sobre todo para un niño, las matemáticas son algo propio de la clase, algo restringido al espacio delimitado por las paredes del aula, que pierde todo sentido más allá de ellas y carece de utilidad para la comprensión de su realidad más inmediata.

Y así fue en Occidente durante muchos siglos. En la Edad Media y en el mundo clásico, los números tenían poco que ver con la realidad. Se vivía en un mundo percibido y entendido de forma cualitativa. Algo que cambió drásticamente en un período de tiempo relativamente corto, que va desde 1250 hasta 1350. En ese breve intervalo de tiempo, se desarrolló más la polifonía y se inventaron el reloj mecánico, el cañón y, probablemente, la perspectiva y los libros de contabilidad. Inventos que ofrecían una imagen cuantitativa de la realidad o que obligaban a crearla y manejarla. Antes de ellos, tiempo y espacio eran esencialmente cualitativos. En un libro delicioso, *La medida de la realidad,* el historiador Alfred W. Crosby describe este mundo cualitativo medieval y la transición a lo que él denomina *pantometría*, la obsesión por medir, por convertir en número cualquier aspecto de la realidad.

El hombre medieval percibía el tiempo de un modo muy diferente a nosotros. El tiempo histórico no se basaba en cronologías exactas, sino que sólo estaba jalonado por grandes acontecimientos, como el diluvio universal o la vida de Jesucristo. Era más "un escenario" que una línea de acontecimientos. El tiempo cotidiano era también bastante cualitativo. Existían las horas, pero su duración distaba mucho de ser exacta. Por ejemplo, había siempre doce horas de día y doce de noche, tanto en verano como en invierno, con lo que las horas diurnas veraniegas eran mucho más largas que las del invierno. A su vez, lo único que marcaba ciertos intervalos de tiempo de forma pública eran las campanas de los monasterios, que indicaban las "siete horas canónicas": maitines, prima, tercia, sexta, nona, vísperas y completas. La poca precisión con la que se tocaban estas horas canónicas queda vivamente de-

mostrada por la etimología de la palabra inglesa *noon*, que hoy en día denota las doce del mediodía, pero cuyo origen se encuentra en una de esas horas: la *nona*. La nona correspondía a la novena hora a partir del amanecer, es decir, más o menos a las tres de la tarde. Sin embargo, con el tiempo la llamada a nonas se fue adelantando, debido probablemente al hambre de los monjes, ya que era ésa la hora en la que pretendían tomar el primer bocado del día. Los períodos de tiempo menores que una hora, como la duración de la cocción en una receta, se medían mediante fórmulas cualitativas que han pervivido hasta nuestros días, como el rezo de un credo para un huevo pasado por agua. No había minutos ni segundos, y las horas se hinchaban y contraían dependiendo de la época del año y de las actividades de los monjes.

El espacio medieval era también muy distinto del espacio moderno. Los mapas estaban llenos de lo que ahora calificaríamos como distorsiones. Sin embargo, estas distorsiones no siempre se debían a una falta de pericia o de medios técnicos, sino que eran consecuencia lógica de la función misma del mapa en la Edad Media: no pretendían guiar al viajero o al navegante, sino dar una imagen del mundo, "facilitar información sobre lo que estaba cerca y lo que estaba lejos, y lo que era importante y lo que no lo era". Los mapas de ayuda a la navegación, como los primeros mapas *portolanos*, en donde se detallaban con precisión los puertos a lo largo de las costas europeas y norteafricanas, surgieron a principios del siglo XIII. Antes de esa fecha, los mapas apenas si se utilizaban con ese fin.

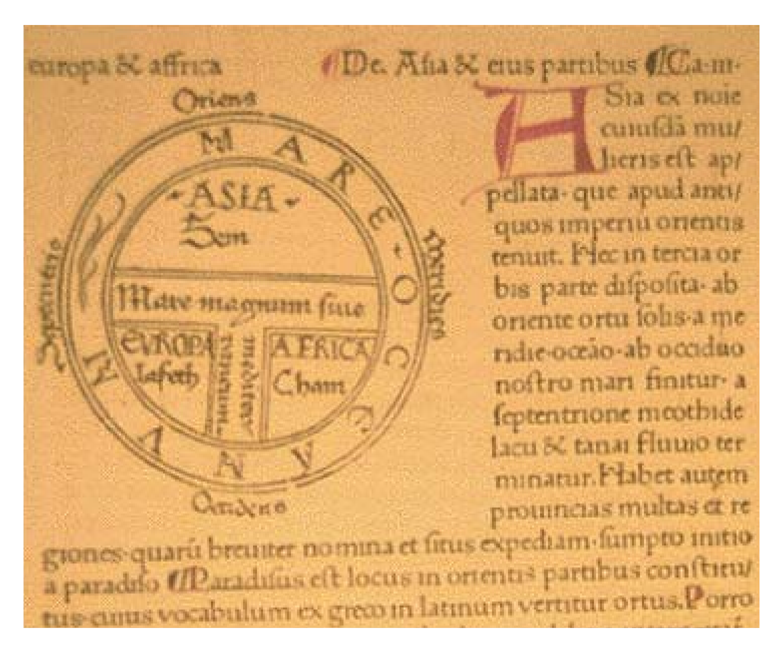
En un mundo no medido, los números tenían poca cabida y, cuando se utilizaban, cobraba más importancia su simbología que su modesta referencia a la simple cantidad. Veamos por ejemplo cómo describe algunos números Bartolomaeus Anglicus, en el siglo XIII, traducido por Fray Vicente de Burgos al español en 1494:

"El numero de ocho es conplido por una unidad puesta sobre siete y es compuesto de dos vezes quatro que son numeros pares y de V y tres que son nones y de VII y uno y significa la abundançia de gloria que avran los que avran las siete virtudes o los que avran los siete dones del Espiritu Santo.

"Una unidad puesta sobre VIII haze IX que es numero compuesto de tres vezes tres y significa el estado y la gloria de las tres hierarchias de los angeles de las quales cada una ha conformidad a la Trinidad gloriosa y son permanesçientes en la suma deidad sin medio alguno.

"El numero de X añade una unidad sobre IX y es el fin y termino de todos los numeros simples ca quien pasa X contando torna a uno y dende a dos y assi de los otros. El numero de X que es el fin de todos numeros sinples es el comienço de todos numeros compuestos y significa Dios que es fin y comienço de todas creaturas sean sinples como los angeles o compuestas como los honbres."

La notación es en parte romana, una notación que de por sí no facilita los cálculos. El número no sólo estaba alejado de la vida cotidiana, sino que era un artefacto místico, relacionado con los espacios sagrados y con el arte más abstracto, la música. De ahí que



Un "mapa" medieval de los llamados OT, que representa los tres continentes conocidos en la época separados por dos mares en forma de T. El mapa está orientado con el este hacia arriba, ya que, siendo la dirección de la salida del Sol, era el punto cardinal de mayor rango

los cálculos fueran reducidos: se podían hacer sin apenas salirse del complejo sistema de numeración romana, o con los dedos u otras partes del cuerpo y, a partir del año 1000, con el ábaco, importado de Oriente gracias a los musulmanes españoles.

Este mundo medieval cualitativo y sin números, este "modelo venerable", como lo llama Crosby, no ofrecía una imagen más grosera o más ingenua de la realidad. En palabras del propio Crosby, "mostramos desdén ante sus errores", pero nuestro verdadero problema con este modelo estriba en que es "dramático, incluso melodramático: Dios y el Designio se ciernen sobre todo". En la actualidad "queremos (o pensamos que queremos) explicaciones de la realidad desprovistas de emoción, tan anodinas como el agua destilada". Por el contrario, "los europeos de la Edad Media y del Renacimiento, al igual que el chamán, al igual que todos nosotros parte del tiempo y algunos de nosotros todo el tiempo, querían explicaciones que fuesen concluyentes de modo inmediato y satisfactorias desde el punto de vista emocional. Anhelaban un universo que, como dice Camus, pueda amar y sufrir".

Muy probablemente, la experiencia más inmediata del mundo para la mayoría de las personas tiene que ver antes que nada con ese modelo caduco y tosco del Medievo. Nos hemos acostumbrado al tiempo y al espacio compartimentados y medidos, a cuantificar con dinero nuestros deseos y el esfuerzo que estamos dispuestos a realizar para satisfacerlos. Sin embargo, y por más que le pese al viejo Galileo, en lo más íntimo y profundo, seguiremos viviendo en un mundo sin números, o donde los números son un mero juego o una útil, pero limitada, herramienta.

Mark Fischetti

IMPLANTES COCLEARES

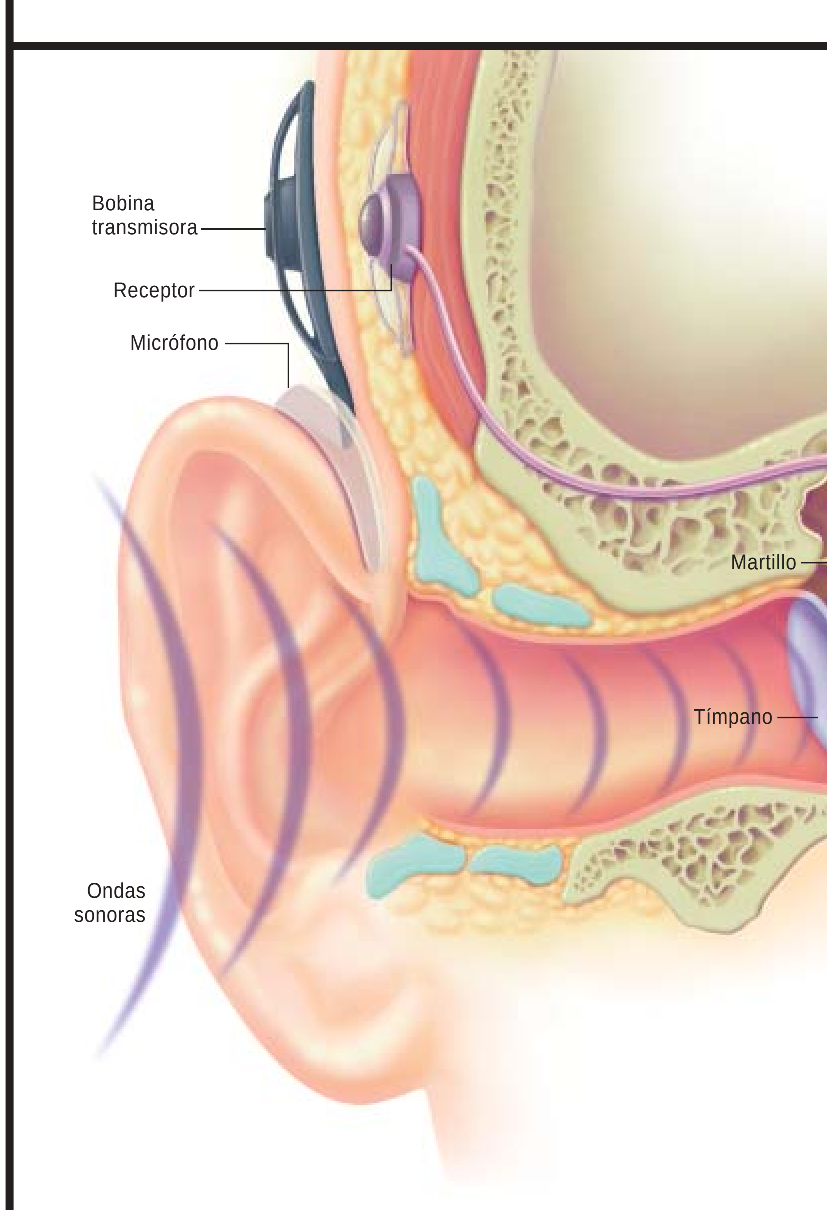
Recuperar el oído

Oímos cuando la cóclea, en el oído interno, estimula al nervio auditivo. Los casos de sordera más corrientes se deben a las minúsculas células ciliadas del interior de la cóclea, que han quedado dañadas en virtud de un defecto genético, una infección, un sonido muy fuerte o el envejecimiento. Los implantes cocleares prescinden de las partes deterioradas; reciben el sonido y lo convierten en señales que envían mediante electrodos a las células contiguas al nervio auditivo.

En todo el mundo, más de 40.000 niños y adultos dependen de implantes cocleares. Ciertas células ciliadas, que revisten los canales cocleares junto a las neuronas auditivas, están sintonizadas para reaccionar a frecuencias concretas. Por consiguiente, los implantes, así el denominado Nucleus, o el Clarion, poseen de 8 a 22 electrodos, que los cirujanos colocan en distintas posiciones para maximizar la gama de estímulos de frecuencia que se reexpiden al cerebro. Investigaciones recientes revelan que aumentar el número de electrodos no mejora los resultados tanto como optimizar su ubicación; la mayoría de los implantados perciben la intensidad correctamente, pero aún les cuesta captar bien el tono, lo que les dificulta la comprensión del habla. “Hay algo que impide al cerebro extraer o asimilar toda la información codificada”, comenta Philip Loizou, profesor de ingeniería eléctrica de la Universidad de Texas en Dallas. “Aún no sabemos qué es.”

Cuanto antes se le haga el implante a una persona que se ha quedado sorda, tanto más probable será que se adapte a su nuevo sentido del oído; quienes llevan años sordos reaccionan peor, por culpa de degeneraciones en la cóclea o en el nervio auditivo. Se entiende que la operación ha tenido éxito si el receptor del implante puede oír sonidos medios, incluso suaves, comunicarse sin leer labios o gestos, y hablar por teléfono.

Se está intentando ahora elaborar algoritmos de procesado de señales adaptados a distintas situaciones. Las personas con implante tienen muchas veces dificultades para distinguir las palabras en los ambientes ruidosos y apreciar la música, con sus complejas formas de onda. Los procesadores de implante actuales se ofrecen con un algoritmo que se aplica a todos los usos, pero quizá podrían almacenar también algoritmos especializados. “Así”, afirma Philip Loizou, “un individuo podría seleccionar un algoritmo según que estuviera hablando en casa, comiendo en un restaurante ruidoso o sentado en un concierto.”

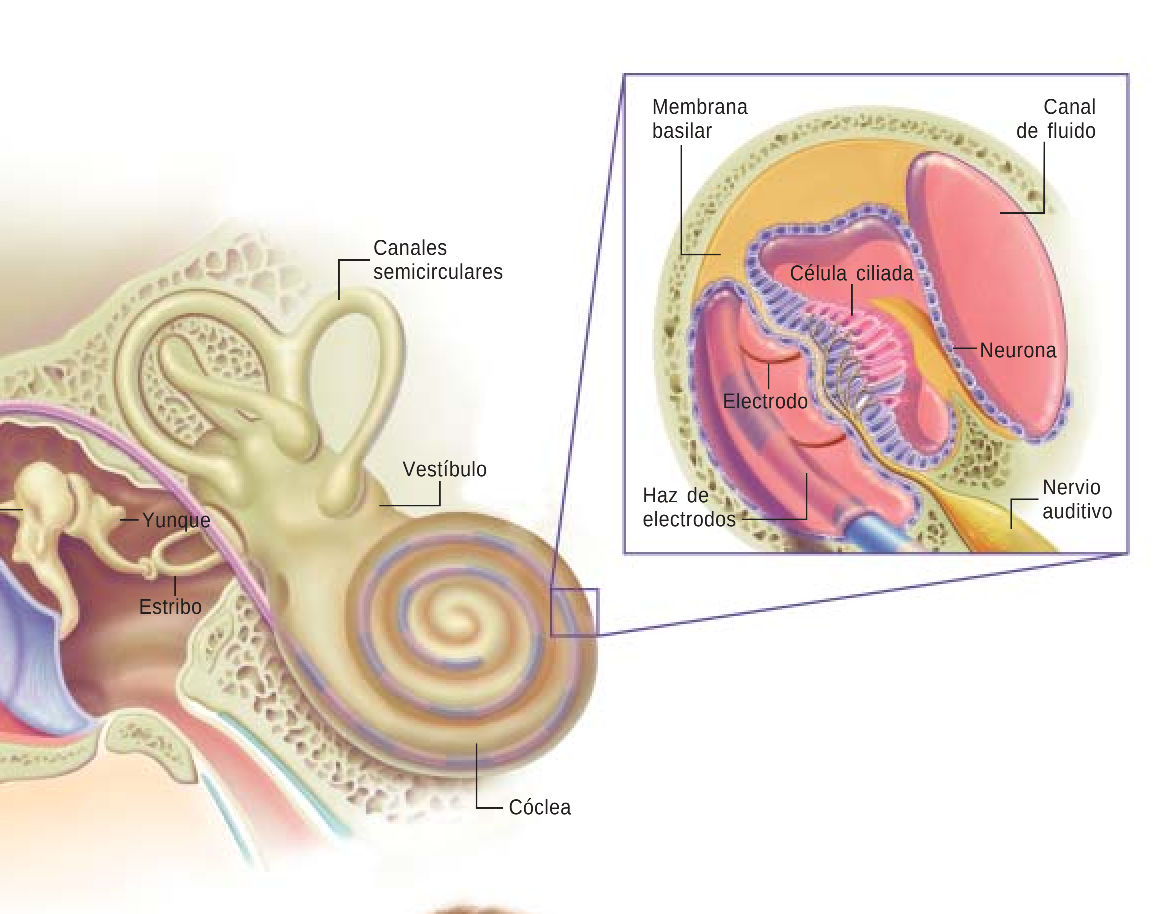


1. EL OIDO EXTERNO capta las ondas de presión sonoras, que el tímpano convierte en vibraciones mecánicas de los huesecillos del oído medio. El estribo, al oscilar, emite ondas de presión por el seno del fluido contenido en la cóclea; las ondas, a su vez, estimulan las células nerviosas del nervio auditivo, que termina en el cerebro.

➤ **¡MAS FUERTE!** Los otólogos miden cuán fuerte debe llegar a ser una señal de prueba para que una persona la oiga. El umbral normal viene a ser de unos 15 decibelios. Las personas con una pérdida de audición “moderada” requieren una señal de 41 a 55 db; con una pérdida “grave”, de 71 a 90 db; y con una pérdida “profunda”, de 91 db o más. Una conversación normal suena a 40 o 50 db; el tráfico de una autopista a 15 m, a 70 db; y una batidora, a 90 db. Sólo pueden optar a un implante coclear las personas con una pérdida grave o profunda en ambos oídos.

➤ **VIRAJE CERRADO:** Al ladearse la cabeza hacia adelante, atrás o un lado, se mueve una sustancia gelatinosa encerrada en el vestíbulo, que está junto a la cóclea. Con ese movimiento, el gel flexiona las células ciliadas y éstas informan a las fibras nerviosas contiguas hacia dónde está inclinada la cabeza, de tal modo que el cerebro pueda mantener derecho el cuerpo. Análogamente, las células ciliadas del interior de los tres canales semicirculares, llenos de fluido y dispuestos entre sí en ángulo recto justo encima de la cóclea, reaccionan a los cambios bruscos en la velocidad de la cabeza, a fin de mantener el equilibrio.

➤ **OIDOS DUROS:** En su “Toma de posición acerca de los implantes cocleares”, la Asociación Nacional de Sordos de EE.UU. hace notar que no siempre dan resultado. Desaconseja asimismo el uso de implantes en los niños sordos de nacimiento o que se queden sordos antes de aprender a hablar, pues aun con este tratamiento les es muy difícil comprender el lenguaje hablado; además, mientras tanto, no se les suelen enseñar lenguajes visuales ni gestuales; ello puede acarrear retrasos en el desarrollo de recuperación dificilísima.



2. LA COCLEA transmite las ondas de presión a través del fluido encerrado en su canal. Desplazan la membrana basilar, que flexiona en mayor o menor grado las células ciliadas. Estas liberan neurotransmisores que activan las neuronas contiguas, las cuales informan al cerebro del lugar del canal donde tuvo lugar la flexión (depende de la frecuencia del sonido original) y de la amplitud de la flexión (que indica la intensidad del sonido).

3. EL IMPLANTE COCLEAR se ayuda de un micrófono colocado tras la oreja para captar el sonido y enviarlo a un procesador, donde algoritmos y circuitos integrados lo amplifican, digitalizan y filtran. Esa señal codificada llega a la bobina del transmisor, que a su vez la remite mediante radioondas, a través de la piel, a un receptor implantado. El receptor convierte las ondas en impulsos eléctricos, que recorren unos electrodos que acaban en determinados puntos de la cóclea. Un imán mantiene adosado el transmisor al receptor implantado.

Procesador (en el bolsillo de la camisa)

Galeno

Doctrina sesquimilenaria

GALEN ON FOOD AND DIET, por Mark Grant. Routledge; Londres-Nueva York, 2000. **GALEN. ON THE PROPERTIES OF FOODSTUFFS (DE ALIMENTORUM FACULTATIBUS).** Introducción, traducción y comentario de Owen Powell; prólogo de John Wilkins. Cambridge University Press; Cambridge, 2003.

“ON SECOND THOUGHT” AND OTHER ESSAYS IN THE HISTORY OF MEDICINE AND SCIENCE, por Owsei Temkin. The Johns Hopkins University Press; Baltimore, 2002.

GALEN AND GALENISM. THEORY AND MEDICAL PRACTICE FROM ANTIQUITY TO THE EUROPEAN RENAISSANCE, por Luis García Ballester. Ashgate; Aldershot, 2002. **MEDICINE IN A MULTICULTURAL SOCIETY,** por Luis García-Ballester. Ashgate; Aldershot, 2001. **LA BÚSQUEDA DE LA SALUD. SANADORES Y ENFERMOS EN LA ESPAÑA MEDIEVAL,** por Luis García Ballester. Ediciones Península; Barcelona, 2001. **HISTORIA DE LA CIENCIA Y DE LA TÉCNICA EN LA CORONA DE CASTILLA. EDAD MEDIA 1.** Luis García Ballester, director. Junta de Castilla y León: Consejería de Educación y Cultura; Salamanca, 2002.

Entre los fenómenos sobresalientes de la cultura occidental, el sistema derivado de la obra de Galeno de Pérgamo (129-210/216) ocupa, con la filosofía griega, el derecho romano y el monoteísmo cristiano, un puesto de honor. Perduró desde el siglo III hasta el XVII, cuando Paracelso y la iatroquímica cuartearon sus fundamentos. Si bien no debe olvidarse que, hace sólo cincuenta años, cuando la antibioterapia se encontraba en su infancia y apenas había fármacos sintéticos, las boticas expedían muchos medicamentos “galénicos”: tinturas, jarabes, extractos y similares. Del atractivo de tal doctrina dan fe las ediciones vernáculas (*Galen on Food and Diet* y *Galen. On the Properties of Foodstuffs*) y las compilaciones de trabajos clásicos en torno a su figura y a su prolongación en el tiempo (Temkin y García Ballester).

Pérgamo, donde vio la luz un mes de septiembre, era entonces un poderoso centro intelectual del helenismo. Allí se inició en el dominio de la literatura griega, cuya lengua exaltaría con pasión, se familiarizó con la filosofía platónica, aristotélica y estoica, aprendió geometría y métodos demostrativos que llevaran con rigor a la verdad. Y recibió las primeras lecciones de medicina. Tras un breve repunte neohipocrático proliferaron, en los círculos médicos, maestros y escuelas. Partidarios de un tramado teórico y seguidores del humoralismo hipocrático eran los dogmáticos; los empíricos se atenían a las observaciones y a los resultados de los remedios aplicados; los llamados pneumáticos debían tal apelativo a su énfasis en un hálito sutil (*pneuma*), de origen externo al cuerpo, que animaba o alentaba los constituyentes últimos del organismo y sus funciones vitales principales. Galeno no fue alumno pasivo, sino que participó en los debates y querellas entre unos y otros.

Aconsejaba Hipócrates que el buen médico debía viajar, oír a otros maestros. A los veinte años, Galeno comenzó un recorrido de dos lustros. Se detuvo primero en Esmirna, donde enseñaba Pelops, quien le desmenuzó a Hipócrates y le introdujo en la semiología clínica, anatomía, fisiología y terapéutica. Galeno compuso allí un libro *Sobre los movimientos del tórax y los pulmones*. De Esmirna, por consejo de Pelops, se dirigió a Corinto, para ahondar en anatomía con Numisianus. Cuando éste, al poco, parte hacia Alejandría, le sigue Galeno. Desde el año 152, y durante cinco más, permaneció en la capital de helenismo. Resulta incomprensible que no se percatara de la práctica de la autopsia humana en Alejandría (sus errores se deben en buena medida a tomar por modelo a cerdos y simios), estancia que coincide con la culminación de su formación anatómica y sus primeros hallazgos miológicos de alcance. Desde el punto de vista de la metaciencia, depura en ese período sus métodos lógicos de razonamiento y demostración, de cuño aristotélico.

Hacia el año 157, pertrechado de un sólido bagaje filosófico y científico, Galeno torna a Pérgamo, para hacerse cargo de la escuela de gladiadores, que le va a permitir aplicar sus conocimientos quirúrgicos y dietéticos. En el otoño de 161 inicia un nuevo viaje, ahora por Lemnos, Chipre y Siria, antes de llegar a Roma el verano del 162. En esta última, se ganó pronto la amistad de Glaucón, pero también la enemiga de numerosos competidores, representada en una famosa disputa sobre la conveniencia o no de la sangría, defendida por Galeno en casos de plétora (“exceso de humor sanguíneo”). Su relación con la clase dirigente se extiende hasta el mismo cónsul Flavius Boethus, a cuyo ruego escribe *Sobre el uso de las partes*, que, junto con *Sobre los procedimientos anatómicos*, marcan el apogeo del pensamiento anatómico y fisiológico. Declarada una epidemia de peste, vuelve a Pérgamo en el año 166. No por mucho tiempo. Dos años más tarde, Marco Aurelio y Lucius Verus reclaman su presencia en Aquilegia; desde allí se encamina a Roma, nombrado médico de la familia del primero.

Entre el 169 y su muerte, fechada entre 210 y 216, transcurre el período de su máxima creatividad. Culmina obras esbozadas o redacta otras nuevas. De su extensa bibliografía merecen recordarse, amén de las citadas, *Sobre las doctrinas de Hipócrates y Platón, Sobre las facultades y temperamentos de los medicamentos simples, Sobre el mantenimiento de la salud*,



Galeno e Hipócrates. Fresco de la catedral de Anagni

Higiene, Sobre el método terapéutico, Sobre la localización de las enfermedades, Sobre las facultades de los alimentos, *Sobre la cura por flebotomía* y *Sobre los antídotos*.

¿Cuáles eran los trazos esenciales del pensamiento de Galeno? Cumplía a la medicina conservar la salud y remediar la enfermedad. En ambos propósitos se hallaban comprometidos naturaleza y arte. Puesto que, de acuerdo con Aristóteles, la naturaleza no operaba en vano, cada parte, en razón de su disposición, se atiene a la función asignada en el mantenimiento armónico del cuerpo. Partes del soma, en el lenguaje de Galeno, son articulaciones, venas, arterias, músculos y nervios. Al soma había que añadir una triple alma, racional con sede en el cerebro, irascible asentada en el corazón y concupiscible en el hígado. Para su actuación, el alma se servía de sus facultades o potencias (*dynameis*).

En su intervención, el médico debía guiarse por “indicaciones terapéuticas” (*endeixeis*), fundadas en cuatro principios: la categoría o naturaleza de los procesos mórbidos, la naturaleza del órgano en que reside la enfermedad, la constitución individual del paciente y las causas externas. Con tales criterios dividía las enfermedades entre las que implicaban un daño local (heridas, fracturas, vasos rotos, úlceras), las que derivaban de un desequilibrio general de la complexión (*dyskrasia*) manifestado en la fiebre y las que implican una tumescencia patológica (inflamación, tumores, etc.).

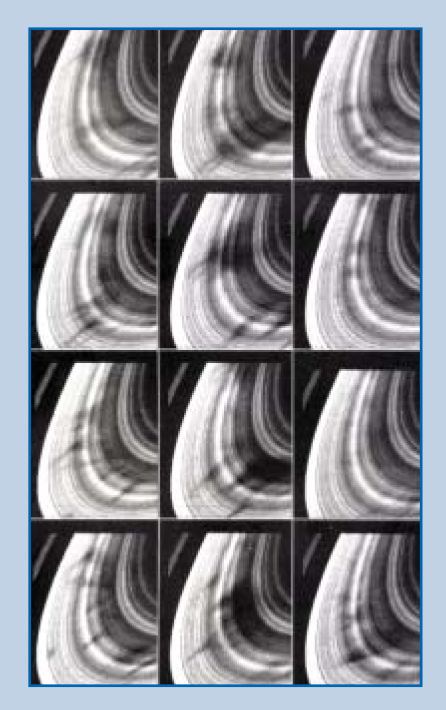
El concepto de *dyskrasia* nos lleva a la teoría humoral. Seminal en Hipócrates, afianzada en la escuela pneumática, constituye la espina dorsal de la doctrina de Galeno. Los humores (o fluidos corporales) se reducían a cuatro básicos, sangre, flema o pituita, bilis amarilla y bilis negra. La sangre, señala, no debe identificarse con la que aparece en una sangría o trauma, porque entonces contiene las dos bilis y flema, amén de sangre en sentido estricto. La flema comprendería lo que hoy llamamos mucus. La bilis amarilla abarcaba un grupo amplio de fluidos cuya coloración iba del grisáceo al amarillo intenso; se recogía en la vejiga. No resulta fácil identificar la bilis negra de la teoría humoral. En ocasiones alude a los fluidos obscuros de derrames intestinales y a la orina obscura de la hematuria. Se ha apuntado incluso que podría tratarse de un constructo para completar la tétrada, guarismo muy socorrido.

Expedición a Saturno

MISSION TO SATURN. CASSINI AND THE HUYGENS PROBE, por David M. Harland. Springer; Berlín, 2003.

Saturno, por su distancia al Sol el séptimo de los planetas del sistema solar y el segundo por su tamaño, es uno de los astros más luminosos del firmamento nocturno. Pero su observación desde la Tierra, incluso con los instrumentos más potentes, resulta muy difícil, pese a sus dimensiones gigantescas, pues desde aquí sólo nos muestra una densa capa de masas nubosas en movimiento y renovación continuos.

Tradicionalmente se dijo que se trataba de un planeta de tipo joviano. Como Júpiter, presenta un sistema de bandas claras y oscuras alternadas, y amén de otras analogías, entre las que se cuentan su gran número de satélites. Pero lo que de Saturno siempre fascinó a los astrónomos fueron los anillos, una corona muy ancha y de poco espesor constituida por miríadas de fragmentos sólidos. A esto podríamos añadir, en estos comienzos de la era espacial, el interés que despertaba la presencia de su satélite Titán, el mayor de los satélites de todos los planetas del sistema solar y el único de ellos poseedor de una atmósfera.



Mission to Saturn empieza con una muy interesante exposición de la historia de los estudios sobre Saturno realizados desde nuestro planeta a partir del siglo XVI, con nombres por todos conocidos como los de Copérnico, Galileo o Huygens, y que podrían tomar como referencia para un relativo hito final el año de 1957, cuando la entonces Unión Soviética situaba su *Sputnik* en órbita. Se iniciaba la era espacial y con ello se abrieron otras perspectivas para los estudios sobre el sistema solar.

El primer acercamiento a Saturno mediante un ingenio espacial del tipo sonda robótica tuvo lugar el primero de septiembre de 1979 en la misión del *Pioneer* 11, lanzada el 5 de abril de 1973 con rumbo a Júpiter, y desde cuyas proximidades la sonda, tras cumplir sus tareas en su acercamiento a ese planeta, fue catapultada por gravitación hacia Saturno. Atravesó el plano anular de éste y luego hizo un acercamiento a Titán, para emprender el regreso hacia la Tierra. Vinieron después las visitas de las misiones *Voyager* (también con sondas robóticas) durante los años 1980 y 1981, con el lanzamiento del *Voyager* 1 en septiembre de 1977, dentro de un programa de penetración y exploración en las zonas más externas del sistema solar hasta lo posible.

Tanto las misiones *Pioneer* como las *Voyager* se programaron y dotaron con vistas a unos objetivos perfectamente definidos, aunque a veces tuvieran que sufrir variaciones, y de esos objetivos (que podrían resumirse simplemente como un decidido propósito de reunir la mayor cantidad de información posible) y cómo se alcanzaron tratan los capítulos 2 y 3. La exposición no es lineal, con una mera relación de fechas y hechos. El autor, David M. Harland, especialista en historia espacial, presenta los logros describiendo los medios, es decir, los equipos, que sirvieron a ellos y las circunstancias que incidieron en su consecución. Interesantes resultan las evocaciones del estado de los conocimientos antes de que Saturno sólo pudiera contemplarse a "distancias siderales". El capítulo 4 está dedicado a la comitiva de Saturno, a exponer lo que se sabe y se cree saber acerca de sus integrantes, a la luz de la información recogida por las misiones *Pioneer* y *Voyager*. En este punto cabe advertir que al buscar información sobre Saturno y su sistema en una enciclopedia, de ésta conviene comprobar su fecha de edición, pues hay un antes y un después de las misiones *Pioneer* y *Voyager*.

De hecho, el título del libro está dedicado a su quinto y último capítulo, *Cassini-Huygens*, nombre dado a la misión conjunta entre la NASA, la Agencia Espacial Europea y la Agencia Espacial Italiana cuya entrada en órbita en torno a Saturno está prevista para 2004. Será llevada a cabo por la astronave *Cassini*, así llamada en honor de Jean Dominique Cassini, astrónomo francés del siglo XVII, descubridor de siete de los satélites de Saturno, primer director del Observatorio de París y primero de una estirpe de astrónomos. Ese viaje por el sistema saturnal tiene una duración prevista de cuatro años y la realizará el ingenio más instrumentado de los hasta ahora enviados al espacio lejano, con el propósito de recoger datos acerca de los interiores del planeta, su atmósfera, magnetosfera, anillos y satélites.

Huygens es la sonda que será lanzada desde *Cassini* a la atmósfera de Titán, cuya composición se cree relacionada de algún modo con las moléculas que en la Tierra fueron las precursoras de la vida. Porta el nombre de Christian Huygens, físico y astrónomo holandés del siglo XVII, cuyos logros en el campo de la astronomía se cifran en el descubrimiento de un satélite de Saturno y los anillos de éste, así como un procedimiento para perfeccionar la talla de las lentes de los telescopios.

Estamos, pues, ante un texto especialmente destinado a quienes deseen prepararse para seguir los pormenores de este próximo acercamiento a las profundidades del sistema solar, informándose sobre cómo nació y se planeó la *Misión a Saturno*, lo que hará y cómo lo hará y de qué modo puede que sus observaciones revolucionen nuestros conocimientos acerca del sistema saturnal.

—JOSÉ VILARDELL



Plato romano del siglo II *d. C. Aparecen ilustrados distintos alimentos*

En efecto, por combinación de los cuatro elementos (aire, fuego, agua y tierra) se formaban los humores. Cuatro cualidades entraban en la descripción de los elementos de los cuerpos naturales. A modo de extensión, o resultado de los humores emergían cuatro "temperamentos". Había flemáticos, melancólicos, coléricos o sanguíneos. El equilibrio (*krasis*) o desequilibrio humoral trazaba la línea de separación entre la condición normal y la patológica. En esta doctrina se basa la dieta según Galeno (*Galen on Food and Diet*, donde se recogen *Sobre las facultades de los alimentos* y varios opúsculos complementarios, y *Galen. On the Properties of Foodstuffs*). ¿De qué trata *Sobre las facultades de los alimentos*? Dividido en tres partes, aborda plantas y animales que nos nutren, con particular detenimiento en cereales y leguminosas. Galeno era botánico experto, puntilloso en la identificación y descripción precisa de las especies, que había herborizado por Asia Menor y observado su variación estacional, climática y geográfica. Había leído a Teofrasto y, a la manera de Dioscórides, clasifica las plantas de acuerdo con el criterio de la similaridad.

En la dietética, piensa Galeno, se esconde la mejor terapéutica y, en el trigo, el fármaco más eficaz. De acuerdo con la biología aristotélica, entiende la nutrición como "asimilación de lo que nutre a lo que se está nutriendo". Creía que en el área cardioesofágica se producía el estímulo del hambre. Ahora bien, el estómago, que carecía de poder de percepción, debía ser informado de esa necesidad por mensajes remitidos por el sensorio (la fuente de sensación). Los mensajes se transmitían vía dos nervios vagos que terminaban en plexos alrededor del estómago. Para cada especie hay alimento que le es propio y alimento que no lo es. Ni el hombre come hierba, ni el pollino pescado. Cuando se ha ingerido el alimento adecuado, comienza una secuencia de cambios bajo la influencia de la facultad alterativa. Las transformaciones que sufre en la boca constituyen un cambio físico, llevado a cabo por la masticación y la presencia de saliva (referida a la flema). Este cambio prepara el alimento para su paso ulterior al estómago. El bolo baja por el esófago instado por la facultad atractiva del estómago. A la facultad retentiva se debe que el alimento persista en el estómago, donde experimenta una cocción (*pepsis*), que convierte el sólido en fluido (*chymos*) o quimo. En virtud de la facultad expulsiva del estómago se producía un doble efecto: se iniciaba un proceso de *anadosis* o distribución de una pequeña proporción del quimo hacia el sistema de la vena porta y una proporción mayor del quimo, expelida a través del píloro, hacia el interior del duodeno. Tras su procesamiento final en el hígado, la sangre nutriente, en que se había convertido el quimo, se dirigía hacia el sistema de la vena cava que drena el cuerpo y de ese modo pasaba a la periferia. En el marco teórico de las transformaciones y "fuerzas o facultades", la sangre nutriente se convertía en tejido (hueso, músculos y tendones).

Pero el alimento ofrecía, además, una vertiente farmacológica, desarrollada en *Sobre las facultades y temperamentos de los medicamentos simples*. En una nueva tétrada reparte los medicamentos (*pharmaka*). Los de primer tipo, que permanecen inalterados en su paso por el cuerpo, minan la salud de éste hasta la extenuación, pues son venenosos. También son tóxicos los del grupo segundo, que "se corrompen y pudren y, en consecuencia, pudren y corrompen al cuerpo". Los del tercer tipo aportan calor al cuerpo, sin ocasionarle daño. Por fin, a los del tipo cuarto el cuerpo los asimila y resultan, por tanto, a un tiempo, fármaco y alimento. Para Galeno, la nutrición sustituye las pérdidas del cuerpo, sin cambiarlo. En ello estriba la diferencia fundamental entre nutrimento y fármaco. Lo que se asimila y ayuda, por tanto, a crecer o a mantenerse en su estatuto es el nutrimento; lo que cambia el temperamento del cuerpo es medicina o veneno.

Nutrición y farmacología son objeto de revisión en el libro de Temkin (*"On Second Thought" and Other Essays in the History of Medicine and Science*), que incluye, además, artículos fundamentales sobre ética médica, juramento hipocrático, frenología y enseñanzas actuales de la medicina clásica. Temkin ha sido el gran estudioso de Galeno y el galenismo. Reticente a

Física musical

MEASURED TONES. THE INTERPLAY OF PHYSICS AND MUSIC, por Ian Johnston. Institute of Physics Publishing; Bristol, 2002.

Esta obra, ya en su segunda edición revisada y actualizada, se publicó originalmente en 1989; en el ínterin se ha reimpreso 4 veces. Es un libro muy atractivo, ameno y de fácil lectura, incluso para legos en las materias de física y música con deseos de profundizar en la relación entre ambas, a quienes proporcionará unas ideas muy claras sobre el porqué y el funcionamiento de los distintos instrumentos musicales con una profusión de gráficos y detalles muy sencillos en un lenguaje llano. Su subtítulo es "La relación entre física y música", a lo que habría que añadir "en la historia de la civilización", pues relaciona estos tres elementos ofreciendo datos y visiones nuevas de cómo el avance de la civilización se ha plasmado en el progreso de los instrumentos musicales, de manera que los nuevos conocimientos de la física se reflejaba en la construcción y constitución de los instrumentos, que a su vez eran aprovechados por los compositores. El libro seguramente abrirá los ojos a los físicos alejados de la música y a los músicos sin base física; a estos últimos les será muy útil para explicar fenómenos que dominan, pero que hasta ahora difícilmente sabían explicar.

La evolución de la música y de los instrumentos musicales se sigue de una forma histórica y se explican los detalles físicos de cada uno de ellos en forma de capítulos e interludios. Dedica los capítulos a las teorías físicas mientras que los interludios atienden a los instrumentos musicales; empieza por los metales, seguidos del piano, las cuerdas, las maderas, la percusión, los instrumentos electrónicos y la voz, con un interludio consagrado a la acústica en arquitectura.

Entre las novedades destacan la explicación del funcionamiento del oído, como sistema analítico espectrográfico de la membrana basilar, lo que a su vez da cuenta del concepto de la consonancia y lo que nuestro oído considera como disonancia. Y una vez más pone de relieve la importancia de nuestro oído como elemento fundamental en la percepción del sonido y de la música, alejándonos de teorías matemáticas que tanto tiempo estuvieron en boga. También explica de forma científica la enarmonía de los instrumentos de percusión, con sus conceptos matemáticos, y las famosas configuraciones de Chladni.

Abre un espacio para la irrupción de los ordenadores en la música y expone que una posterior revisión significará una ampliación de nuestros conocimientos gracias a que cada vez son más rápidos y versátiles los ordenadores. El texto se complementa con una serie de apéndices sobre aspectos como notación, medidas de intervalos y de intensidad, impedancia acústica y escalas pentatónicas, más una bibliografía muy completa y relevante para los que quisieran profundizar en cualquiera de los temas propuestos. —ANDRÉS LEWIN RICHTER

considerar la obra del de Pérgamo un sistema articulado (él lo consideraba más afín a una labor enciclopédica) no dudó en poner de manifiesto las contradicciones, repeticiones e imprecisiones, aunque tampoco silencia las pautas permanentes que permiten tejer un cuerpo de doctrina más o menos permanente. Así, a propósito de los pneumas y las funciones vitales.

En su revisión histórica recuerda que el término *pharmakon*, amén de veneno, portaba en su origen una significación de droga catártica. En cuanto catártica, limpiaba al cuerpo de humores superfluos y materia pecadora. Galeno se apoya, por el contrario, en el principio sanador y seculariza el concepto. Competía al médico reconocer la naturaleza de la enfermedad *contraria contrariis curantur*. Lo mismo en las medicinas que en los alimentos, si el temperamento de una persona se desvía hacia un extremo, por ejemplo, tornándose caliente en tres unidades (imaginarias), el alimento debe desviarse el mismo grado en la dirección opuesta (es decir, debe ser tres unidades más frío). La enfermedad se cura devolviendo la combinación cualitativa a su condición normal. Nuestro constipado podría curarse con remedios secos y cálidos, quizá guardando cama y tomando un vaso de vino seco.

Las doctrinas de Galeno, transmitidas en textos griegos originales y en sus traducciones, así como en resúmenes y compendios o comentarios por otros médicos, crearon el galenismo. Recibió una coherente estructuración en manos de científicos y médicos musulmanes entre los siglos X y XII. Al estudio del galenismo bajomedieval, sobre todo en los reinos españoles de la Corona de Aragón y de Castilla, se dedicó García Ballester con profundidad internacionalmente reconocida (*Galen and Galenism*, *Medicine in a Multicultural Society*, *La búsqueda de la salud* y *Historia de la ciencia y de la técnica en la Corona de Castilla. Edad Media 1).* Le interesó su recepción y renovación (el "nuevo Galeno") en las comunidades judías, árabes y cristianas, así como sus bases biológicas, relacionadas con la introducción universitaria de los escritos aristotélicos, y sus repercusiones sociales.

Galeno se cristianiza, se latiniza, a finales del siglo XI en el sur de Italia. Constantino el Africano traduce en Salerno-Montecassino las síntesis de Hunain ibn Ishaq, al-Magusi, Isaac Israeli y Ibn al-Gazzar. De su pluma saldrá la versión del *Pantegni*, una de las enciclopedias médicas mejor trabadas, que correrá por los círculos cristianos desde comienzos del siglo XII. A finales de este siglo, ahora en Toledo, emerge la figura de Gerardo de Cremona. Toledo había sido reconquistada por Alfonso VI de Castilla en 1085. En torno a su catedral se registró muy pronto una intensa actividad intelectual; musulmanes por supuesto, pero también mozárabes y judíos conservaban el árabe como lengua culta, al que pronto se agregó el latín traído por los arzobispos Raimundo y Juan. Lo mismo que en la cuenca del Ebro, la juventud europea comenzó a acudir a Toledo en busca del conocimiento de la ciencia de los árabes, desde medicina hasta cosmología, es decir, desde Galeno hasta Ptolomeo. Todo indica que se siguió un plan metódico de traducciones, de acuerdo con la clasificación de las ciencias

esbozada por los lógicos árabes, en particular la de al-Farabi. Sólo del área de medicina, el grupo encabezado por Gerardo tradujo 20 obras, siendo el de Pérgamo el autor mejor representado. Además se trata ahora de un Galeno con entidad propia, no el escoliasta de Hipócrates.

Gracias a Toledo, se vierten al latín los rudimentos de un galenismo conceptual sobre la constitución del hombre (*De elementis tractatus, De complexionibus tractatus*) y de un galenismo aplicado al ejercicio de la medicina (*De malitia complexionis diverse tractatus*, *De creticis diebus tractatus, De crisi tractatus*), que tiene su principal punto de apoyo en el recetario farmacológico (*De simplici medicina tractatus*). A lo largo de la centuria se van articulando las piezas fragmentarias del sistema galenista, muy incompleto todavía, con la interpretación ofrecida por el *Canon* de Avicena y el *Liber ad Almansorem* de Rhazes. La anatomía, puntal de Galeno, se desconoce todavía y ocupan su vacío las páginas correspondientes del libro de Avicena. Con todo, la presencia del *De ingenio sanitatis* entre las traducciones de Gerardo de Cremona, título con el que en la tradición médica bajomedieval se conoció el gran tratado terapéutico de Galeno *De methodo medendi* o *Therapeutica*, será decisiva para la medicina europea latina.



Grabado de Andrew Boorde

En el siglo XIII el corpus salernitano llega a Castilla. Constaba éste de varios tratados generales que terminaron por fusionarse en un prontuario o syllabus: la *Articella,* en torno a la cual giraron las primeras enseñanzas de las facultades de medicina. Conformaban el syllabus la *Ysagoge* de Johannitius, los *Aphorismi* y *Pronostica* de Hipócrates, breves tratados semiológicos sobre el pulso y la orina y el *Tegni* de Galeno. En el corpus se incluían también los antidotarios salernitanos. La *Ysagoge* de Johannitius distinguía un triple objeto de estudio de la medicina, a saber, las cosas naturales (cosas que forman parte de los seres vivos: elementos, humores, cualidades y complexiones), las cosas antinaturales (enfermedad, sus causas y síntomas) y las cosas no naturales (necesarias para la vida y que afectaban a las condiciones del cuerpo). Particular importancia revistieron en los tratados de dieta o régimen estas últimas: aires y entorno, movimiento y reposo; alimento y bebida, sueño y vigilia, evacuación y repleción (sexualidad incluida), pasiones del alma.

Lo ha puesto de relieve Nancy Siriasi: durante el último tercio del siglo XIII se asiste a una notable intensificación de la actividad científica entre los médicos universitarios de los tres grandes centros europeos de Bolonia, París y Montpellier, que repercutió en la estructura del nuevo curriculum académico. Desempeñaron en ese menester papel determinante Taddeo Alderotti en Bolonia, en París Johannes de Sancto Amando y en Montpellier Bernard de Gordon y Arnau de Vilanova. (A propósito del maestro Arnau, García Ballester realizó un trabajo editor excepcional.) Se trataba del “nuevo Galeno”, un cuerpo de textos médicos constituido por unos 35 libros escritos por Galeno o a él atribuidos, así como un corpus de obras médicas de autores árabes encabezadas por Avicena (*Canon*), Rhazes, al-Kindi y Averroes (*Colliget*). Entre las obras sobresalientes galénicas se contaban *De virtitubus naturalibus*, la colección de textos agavillada bajo el título *De morbo et accidenti, De complexiobus, De crisi, De creticis diebus, De malicia complexionis diverse*, diversas obras sobre el pulso, *De medicinis simplicibus* y *De ingenio sanitatis*.

—LUIS ALONSO

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Cuadrados primos

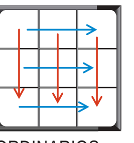
La matriz situada aquí debajo es un cuadrado primo: los números de las filas (769, 953, 797) y de las columnas (797, 659, 937) son números primos, ninguno comienza por cero y no hay dos filas o dos columnas que sean iguales. La matriz es, asimismo, "ambidextra", porque los números de las filas siguen siendo primos al leerlos "hacia atrás", es decir, de derecha a izquierda. Este cuadrado no llega, sin embargo, a "omnidextro": también sus columnas deberían estar compuestas por números primos al leerlas de abajo arriba, y sus diagonales habrían de constar de números primos en ambas direcciones (*véanse los cuadrados del margen derecho*). En nuestro ejemplo, 956 es par y, por consiguiente, no es primo.

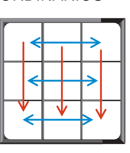
7	6	9
9	5	3
7	9	7

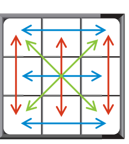
El problema consiste en crear otros cuadrados primos. Para empezar, construyamos un cuadrado primo de orden 4 (compuesto por números de cuatro cifras) que utilice 9 dígitos distintos. No es necesario que este cuadrado sea ambidextro. Se expone a la derecha una solución.

3	2	5	3
8	4	1	9
8	2	6	3
9	3	7	1

Vamos con los problemas. Monte un cuadrado primo omnidextro de orden 3 que utilice tan pocos dígitos diferentes como sea posible. Trate después de construir un cuadrado primo de orden 5 que utilice los diez dígitos; no es necesario que sea ambidextro u omnidextro. Más difícil ahora: ¿podrá usted determinar el conjunto de números n para los que existen cuadrados primos de orden n (sean ordinarios, ambidextros u omnidextros)? Ignoro la respuesta; es un problema que se está investigando todavía. Pero si le gusta jugar con los números primos, puede probar con un juego nuevo, el ta-te-primo.


ORDINARIOS


AMBIDEXTRO


OMNIDEXTRO

Cada jugada consiste en situar un dígito en una de las casillas vacías de una plantilla de 3 por 3. Los jugadores actúan por turno; la novena jugada le corresponde también al segundo jugador. Cuando el dígito colocado por un jugador completa un segmento de tres dígitos alineados, logrará un punto por cada primo de tres dígitos (leído en cualquier dirección) en que figure el dígito recién colocado (dos puntos, por lo tanto, si el número obtenido es primo al ser leído en las dos direcciones). ¿Logrará usted descubrir una estrategia de victoria para alguno de los dos jugadores?

Solución del problema del mes pasado:

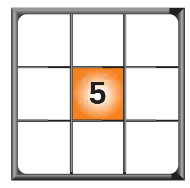
Cuando las ofertas posibles son de 1 dólar o 5 dólares, la estrategia óptima consiste en aceptar sin más las primeras 50 ofertas, y después aceptar sólo ofertas de 5 dólares. Si el cambista ofreciera 1 dólar por cada una de nuestras entradas, y después cerrase el canje, la tasa de lamentaciones sería 1,8 (90 dividido por 50 dólares). Si el cambista ofreciera inicialmente 1 dólar, y después pasara a 5 dólares, la tasa de lamentaciones seguiría siendo de 1,8 (450 dólares dividido por 250 dólares). Si las ofertas posibles fuesen de 1 dólares y de 1 millón, se toman las 45 primeras y se espera después a que las ofertas sean de 1 millón. La tasa de lamentaciones de esta estrategia es 2.

Solución en la Red

Se puede ver la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.

UNA PARTIDA DE TA-TE-PRIMO

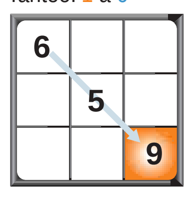
Primera jugada,
Jugador 1
Tanteo: 0 a 0



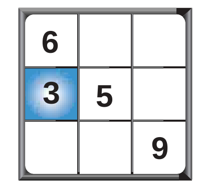
Segunda jugada,
Jugador 2
Tanteo: 0 a 0



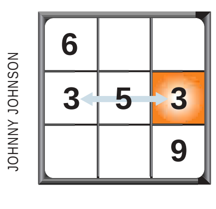
Tercera jugada,
Jugador 1
Tanteo: 1 a 0



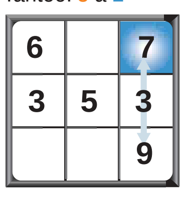
Cuarta jugada,
Jugador 2
Tanteo: 1 a 0



Quinta jugada,
Jugador 1
Tanteo: 3 a 0



Sexta jugada,
Jugador 2
Tanteo: 3 a 2



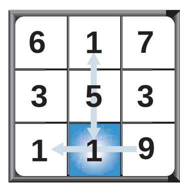
Séptima jugada,
Jugador 1
Tanteo: 6 a 2

6		7
3	5	3
1		9

Octava jugada,
Jugador 2
Tanteo: 6 a 3

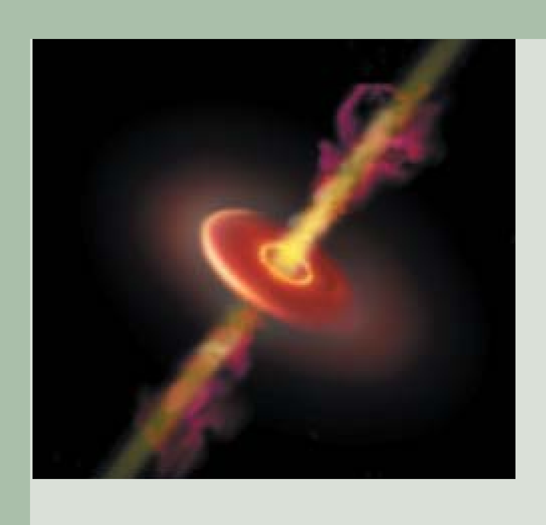
6	1	7
3	5	3
1		9

Novena jugada,
Jugador 2
Tanteo final: 6 a 6



JOHNNY JOHNSON





ASOCIACIONES GALACTICAS, por Kimberly Weaver

¿Por qué los agujeros negros gigantes y los partos múltiples de estrellas, dos fenómenos con muy poco en común, aparecen con frecuencia juntos?

MARES ESQUILMALDOS, por Daniel Pauly y Reg Watson

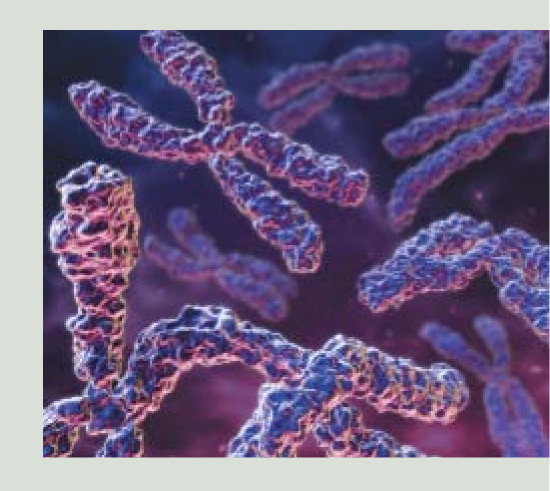
La sobrepesca ha reducido drásticamente las poblaciones de peces, en particular las de las grandes especies depredadoras. Los últimos recuentos indican la necesidad de una gestión más decidida de ese recurso.

ANTENAS ADAPTABLES, por Martin Cooper

Las redes adaptables de antenas pueden convertir las comunicaciones inalámbricas entre móviles en auténticas conexiones por hilos virtuales.

LAS RAICES DEL CANCER, por W. Wayt Gibbs

De acuerdo con la investigación reciente, tendremos que replantearnos la tesis recibida sobre el proceso tumoral. Se traza, además, el camino para detener la oncogénesis en sus primeras fases.





ESTIMULACION DE LA GERMINACION Y EL CRECIMIENTO POR EXPOSICION A CAMPOS MAGNETICOS, por Elvira Martínez, M.ª Victoria Carbonell y Mercedes Flórez

El tratamiento magnético de semillas y el riego con agua tratada magnéticamente permite aumentar el porcentaje y velocidad de germinación, así como la longitud y el peso de las plantas.

IDENTIDAD CUANTICA, por Peter Pesic

Desde hace tiempo los físicos vienen empeñados en descubrir la naturaleza singular de la mecánica cuántica.

CIUDADES PERDIDAS DEL INDO, por Jonathan Kenoyer

En los artefactos hallados en el Paquistán podría hallarse la clave para entender la enigmática civilización del Valle del Indo.

CEREBRO Y BOMBA CORAZON-PULMON, por Bruce Stutz

En lo que ha llegado a ser casi un procedimiento cotidiano la máquina corazón-pulmón “respira” en lugar del paciente durante las operaciones coronarias. Pero, ¿puede tener un lado oscuro esta máquina, vital para el enfermo?

LAS ESFERAS DEL MUNDO, por Denis Savoie

Durante el Renacimiento las representaciones del mundo fueron reflejando progresivamente el copernicanismo, sin dejar de manifestar la influencia de la Antigüedad.

